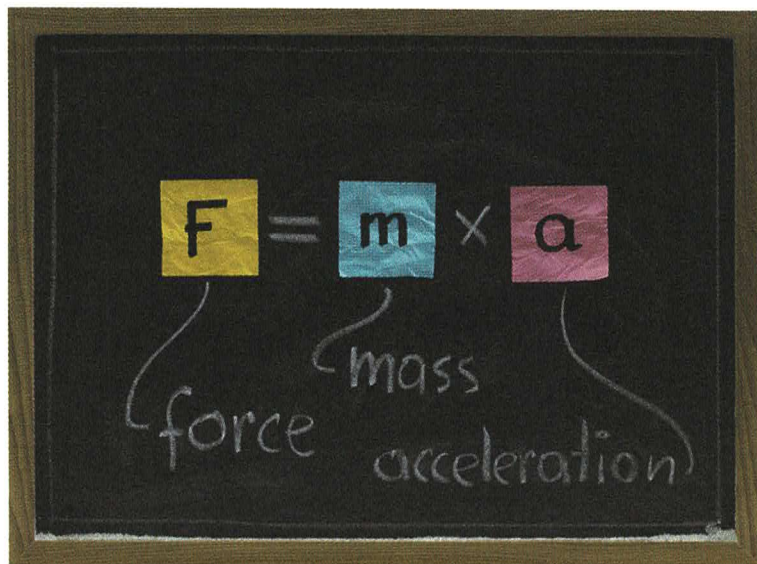


פרק 7 – החוק השני של ניוטון



בפרק זה נדון באחד מחוקי הפיזיקה החשובים ביותר והוא החוק השני של ניוטון. נדון במשמעותו הפיזיקלית, ביישומיו, ובפתרון בעיות פיזיקליות באמצעותו. החוק השני של ניוטון מקשר בין תנועת הגוף ובין הכוח השקול הפועל עליו. הקשר בין הכוח לתנועה נקרא בפיזיקה **דינמיקה**. לכן הדינמיקה נגזרת מהחוק השני של ניוטון.

1. החוק השני של ניוטון

1.1 ניסוח מילולי של החוק השני של ניוטון

בפרק הקודם נוכחנו לדעת שעל פי החוק הראשון של ניוטון, אם הכוח השקול הפועל על גוף מסוים מתאפס, הגוף נמצא בשיווי משקל. בפרק זה נדון במקרה שבו הכוח השקול הפועל על גוף מסוים אינו מתאפס.

הניסוח של החוק השני של ניוטון המופיע בספרו של ניוטון "העקרונות המתמטיים של פילוסופיית הטבע" הוא הניסוח הבא, המבוסס על תצפיות:

אם פועל כוח שקול על גוף מסוים, הגוף נע בתאוצה המכוונת בכיוון הכוח השקול. תאוצה זו נמצאת ביחס ישר לכוח השקול וביחס הפוך למסת הגוף.

ניתן לפרק את החוק השני של ניוטון לשלושת הקשרים הבאים, המקלים עלינו להדגים את החוק וגם עוזרים לנו לנסח אותו בכתיב מתמטי, כפי שנראה בהמשך:

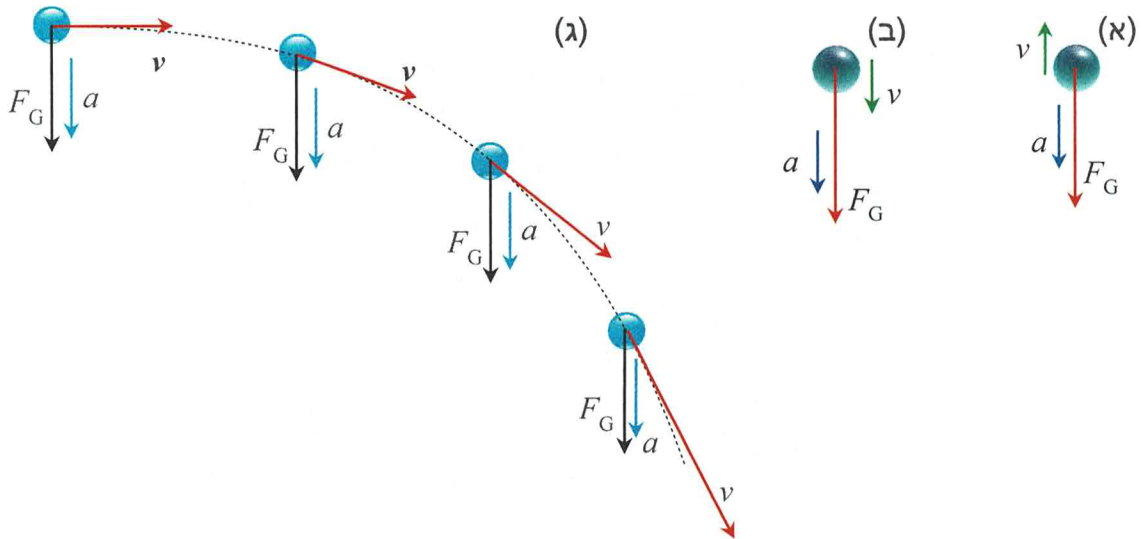
- (1) כיוון התאוצה הוא בכיוון הכוח השקול הפועל על הגוף.
 - (2) גודל התאוצה נמצא ביחס ישר לגודל הכוח השקול הפועל על הגוף.
 - (3) גודל התאוצה נמצא ביחס הפוך למסת הגוף.
- נדון בשלושת הקשרים הנ"ל:

1. כיוון התאוצה הוא בכיוון הכוח השקול הפועל על הגוף:

כל הניסויים והתצפיות מראים לנו שכיוון תאוצת הגוף הוא תמיד בכיוון הכוח השקול הפועל על הגוף. אם נפעיל, לדוגמה, כוח על גוף הנמצא במנוחה, הגוף ינוע תמיד בתאוצה המכוונת בכיוון הכוח הפועל על הגוף. אם נזרוק גוף זריקה אנכית כלפי מעלה (כפי שמתואר באיור 1א) או כלפי מטה (כפי שמתואר באיור 1ב), או בזווית כלשהי כפי שמתואר באיור 1ג, תאוצת הגוף בכל

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

המקרים האלה (בהזנחת כוח החיכוך עם האוויר) מכוונת בכיוון הכוח הפועל על הגוף. כוח זה הוא כוח הכובד F_G המכוון כלפי מרכז כדור הארץ.

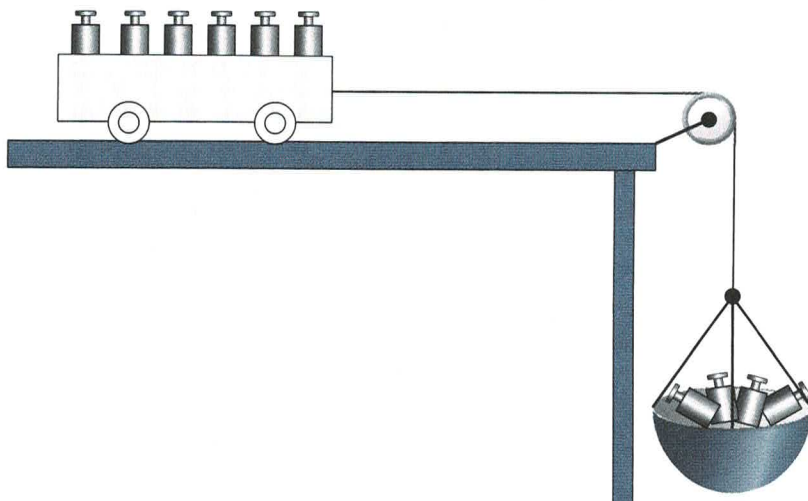


איור 1: (א) בזריקה אנכית כלפי מעלה. (ב) בזריקה אנכית כלפי מטה/נפילה חופשית. (ג) בזריקה בזווית. בשלושת המקרים כיוון התאוצה הוא בכיוון מטה, בכיוון הכוח הפועל על הגוף (F_G).

2. התאוצה נמצאת ביחס ישר לכוח השקול הפועל על הגוף:

ידוע לנו מניסיוננו היום יומי שככל שמגדילים את הכוח הפועל על גוף השינוי במהירותו גדל, כלומר תאוצתו גדלה. אחד הניסויים שנהוג לבצע במעבדה בהקשר זה הוא הניסוי המתואר באיור 2.

בניסוי זה מניחים עגלה עמוסה במשקולות על משטח אופקי, קושרים אליה קצה חוט הכרוך סביב גלגלת ולקצה האחר שלו קשור סל הנמצא באוויר. כאשר מעבירים משקולות בזו אחר זו מהעגלה אל הסל, הכוח השקול הפועל על המערכת, שהוא כוח הכובד הפועל על הסל, גדל, ולעומת זאת מסת המערכת (שהיא מסת העגלה, הסל והמשקולות) נשארת קבועה. אם בכל פעם שמעבירים משקולת מהעגלה לסל מודדים את תאוצת המערכת, מתברר שהיא גדלה ושהיא נמצאת ביחס ישר לכוח השקול הפועל על המערכת (ובמקרה זה לכוח הכובד הפועל על הסל).



איור 2: עגלה עמוסה הקשורה לחוט הכרוך סביב גלגלת שקצהו האחר קשור לסל. כאשר מעבירים משקולות מהעגלה לסל הכוח השקול גדל, אך מסת המערכת נשארת קבועה.

3. התאוצה נמצאת ביחס הפוך למסת הגוף (או המערכת):

ידוע לנו מהניסיון היום יומי שלנו, כי אם מפעילים את אותו הכוח על גופים בעלי מסות שונות, שינוי המהירות הגדול ביותר יתרחש אצל הגוף שמסתו הקטנה ביותר, ולהיפך. את התכונה הזו ניתן לבדוק כמותית בניסוי המתבצע במעבדה באמצעות המערכת המתוארת באיור 2. במקרה זה מודדים את התאוצה של העגלה (המערכת) מספר פעמים, מבלי לשנות את מספר המשקלות בסל. מאחר ומשאירים את מספר המשקלות בסל קבוע, כוח הכובד הפועל על הסל (על המערכת) נשאר קבוע אף הוא. לעומת זאת, בכל מדידה של התאוצה מגדילים את מסת העגלה על ידי הוספת משקולות. לאחר ביצוע הניסוי יסתבר שקיים יחס הפוך בין תאוצת המערכת ובין מסתה.

1.2 ניסוח מתמטי של החוק השני של ניוטון

בספרו "העקרונות המתמטיים של פילוסופיית הטבע", ניסח ניוטון חוק זה בניסוח מילולי בלבד, ואין שם זכר לייצוג מתמטי של חוק זה. אם נעיין בספרו של ניוטון, נגלה שבעת ההיא לא היה נהוג לנסח חוקי פיזיקה ואת היחסים שבין הגדלים בכתוב מתמטי. הכול נעשה בכתוב מילולי בלבד.

היום נהוג לתרגם את כל הקשרים בין הגדלים הפיזיקליים המופיעים בחוקי הפיזיקה לשפת המתמטיקה, שהיא שפת סמלים ופעולות מתמטיות בין סמלים אלה. שימוש בשפת המתמטיקה חשוב מאוד להתפתחות המדעים בכלל ומדע הפיזיקה בפרט, כי מצד אחד היא יותר קלה לכתיבה - במקום לכתוב משפטים ארוכים, כותבים משוואה קצרה שהיא תרגום של המשפט המילולי, ומצד שני שפת המתמטיקה מאפשרת לנו לפתח את החוק או את הקשר הפיזיקלי ולעשות עליו פעולות מתמטיות שקשה עד בלתי אפשרי לבצען על הניסוחים המילוליים.

על מנת לנסח את החוק השני של ניוטון בשפה מתמטית, נרשום מחדש את הניסוח המילולי שלו:

אם הכוח השקול הפועל על גוף אינו מתאפס, הגוף נע בתאוצה. תאוצה זו:

(1) מכוונת בכיוון הכוח השקול הפועל על הגוף.

(2) גודלה נמצא ביחס ישר לכוח השקול הפועל על הגוף.

(3) גודלה נמצא ביחס הפוך למסת הגוף

על מנת לנסח את החוק השני של ניוטון באופן מתמטי, יש להגדיר קודם את היחס הישר ואת היחס ההפוך.

יחס ישר

יחס ישר בין שני משתנים משמעותו שאם אחד מהם משתנה ביחס מסוים (גדל או קטן ביחס מסוים), אז המשתנה השני משתנה באותו יחס. יחס ישר בין שני משתנים מסומן בסימן $(\propto)$. לכן את המשפט השני בחוק השני של ניוטון ניתן לרשום כך: $a \propto \Sigma F$. על מנת לכלול את המשפט הראשון בניסוח המתמטי (שהתאוצה מכוונת בכיוון הכוח השקול), נעזרים בכתוב וקטורי, ורשמים:

$$(1) \quad \vec{a} \propto \vec{\Sigma F}$$

משמעות הביטוי האחרון הוא שהתאוצה נמצאת ביחס ישר לכוח השקול, ומכוונת בכיוון כוח זה.

יחס הפוך

יחס הפוך בין שני משתנים משמעותו שאם המשתנה הראשון גדל ביחס מסוים, אז המשתנה השני קטן באותו יחס - ולהיפך. כלומר אם המשתנה הראשון גדל פי- x , המשתנה השני קטן פי- x . פעמים - או גדל פי- $1/x$ פעמים. מכאן שאם משתנה A נמצא ביחס הפוך למשתנה B , אז המשתנה A נמצא ביחס ישר להופכי של המשתנה B , לכן ניתן לבטא את היחס ההפוך בין A ל- B בכתוב המתמטי באופן הבא:

$$(2) \quad A \propto \frac{1}{B}$$

על פי קשר זה ניתן לרשום את המשפט השלישי בחוק השני של ניוטון (שהתאוצה נמצאת ביחס

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

הפוך למסה) על ידי הכתיב המתמטי הבא:

$$(3) \quad |\vec{a}| \propto \frac{1}{m}$$

(ניתן לרשום את הקשר האחרון בכתיב וקטורי על ידי שימוש במה שנקרא וקטור יחידה, אבל נושא זה חורג ממסגרת הלימוד כאן).

באמצעות הטבלה הבאה, ניתן לראות שאם היחס בין a ו- m הוא הפוך אז היחס בין a ו- $1/m$ הוא ישר:

$m \text{ (kg)}$	$a \text{ (m/s}^2\text{)}$	$1/m \text{ (1/kg)}$
1	12	1
2	6	0.5
4	3	0.25
8	1.5	0.125

מבחינה מתמטית מתקיים שאם $A \propto B$ ו- $A \propto C$, אזי מתקיים ש- $A \propto BC$. על כן, משני הקשרים (1) ו-(3) נקבל ש:

$$(4) \quad \vec{a} \propto \frac{\Sigma \vec{F}}{m}$$

מהקשר האחרון מתקבל $m\vec{a} \propto \Sigma \vec{F}$, שהוא שקול לקשר הבא:

$$(5) \quad \Sigma \vec{F} \propto m\vec{a}$$

הקשר האחרון הוא הייצוג המתמטי לחוק השני של ניוטון. קשר מתמטי זה מבטא את כל היחסים בחוק השני של ניוטון.

1.3 הגדרה כמותית לכוח ויחידות הכוח

בביטוי האחרון ($\Sigma \vec{F} \propto m\vec{a}$) הגדלים m ו- $\vec{a}$ מוגדרים כמותית ויש להם יחידות, לעומת זאת הגודל $\Sigma \vec{F}$ אינו מוגדר כמותית. על פי הקשר האחרון, גודל הכוח הוא פרופורציוני לגודל $m\vec{a}$. הפיזיקאים בחרו להגדיר את הכוח כשווה ל- $m\vec{a}$:

$$(6) \quad \Sigma \vec{F} \equiv m\vec{a}$$

הסימן ($\equiv$) משמעו הגדרה.

כלומר הפיזיקאים בחרו את מקדם הפרופורציה בקשר $\Sigma \vec{F} \propto m\vec{a}$ כשווה-1. היה ניתן לבחור מקדם פרופורציה כלשהו, לדוגמה 2 ($\Sigma \vec{F} = 2m\vec{a}$). במקרה זה הערך המספרי של כל הכוחות בטבע היה אמור לגדול פי 2. אבל מכיוון שהשימוש של הכוח הוא לחישוב התאוצה, נקבל: $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / (2m)$. ולכן התאוצה הנגזרת מהחוק השני של ניוטון לא תשתנה. לכן, לנוחות בחרו הפיזיקאים במקדם הפרופורציה להיות-1 במקום לבחור מקדם פרופורציה אחר. על סמך הקשר (6), ניתן לקבל את יחידות הכוח:

$$(7) \quad [F] = [m][a] = \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$$

יחידה זאת נקראת ניוטון ומסומנת באות N:

$$(8) \quad 1 \text{ N} = \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$$

הגדרה: יחידת הניוטון מבטאת את גודלו של הכוח אשר אם יופעל על גוף שמסתו קילוגרם אחד, יגרם לו לנוע בתאוצה של 1 m/s^2 .

נציין לבסוף שהחוק השני של ניוטון הוא קשר וקטורי, ולכן השימוש בו מחייב בחירת מערכת צירים מתאימה. במערכת xy רושמים את החוק השני ברכיבים בכיוון הצירים x ו- y כך

שמתקבל:

$$(9) \quad \Sigma F_x = ma_x$$

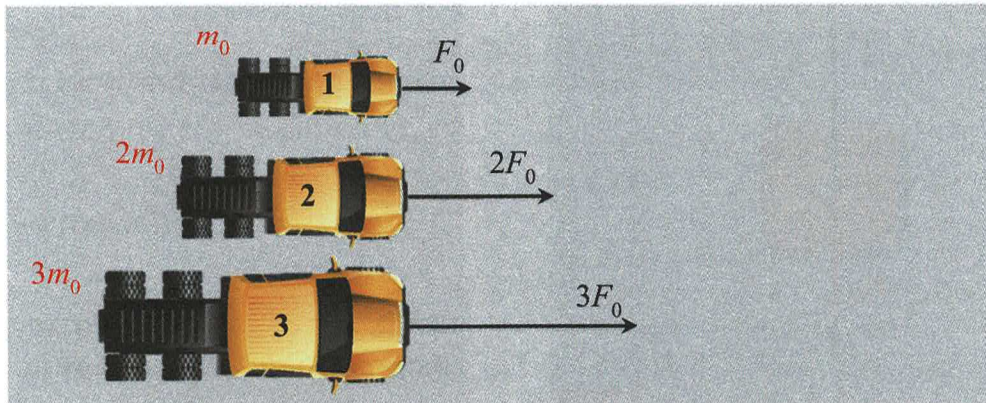
$$(10) \quad \Sigma F_y = ma_y$$

2. כוח הכובד והחוק השני של ניוטון

בפרק 5 מצאנו שכוח הכובד, F_G , שמפעיל כדור הארץ על גוף שמסתו m קילוגרמים הנמצא על פניו נתון על ידי: $F_G = (10 \text{ N/kg})m$. מקורו של קשר זה הוא החוק השני של ניוטון. נסביר זאת: על פי החוק השני של ניוטון, אם כוח F מופעל על גוף שמסתו m וגורם לו לנוע בתאוצה a , גודלו של כוח זה נתון על ידי: $F = ma$. באותה דרך, גודלו של כוח הכובד, F_G , הפועל על גוף מסוים, שווה למכפלת מסת גוף זה, m , בתאוצת הגוף a הנוצרת בהשפעת כוח הכובד. מכיוון שתאוצת הגופים הנעים בהשפעת כוח הכובד (תאוצת הכובד) היא $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, נקבל על פי החוק השני של ניוטון שכוח הכובד הפועל על גוף מסתו m נתון על ידי:

$$(11) \quad F_G = mg$$

נשאלת כאן השאלה כיצד קורה שתאוצת הכובד קבועה עבור גופים שונים, וזאת למרות שכוח הכובד הפועל עליהם שונה? התשובה לשאלה זו היא שכוח הכובד F_G הפועל על גוף, נמצא ביחס ישר למסת הגוף. לכן היחס בין כוח הכובד ומסת הגוף נשאר קבוע, וקבוע זה הוא בדיוק תאוצת הכובד g . הדוגמה הבאה מבהירה נקודה זו: אם מניחים על משטח חלק שלושה גופים שונים 1, 2 ו-3, כמתואר באיור 3, שמסותיהם m_0 , $2m_0$ ו- $3m_0$ (בהתאמה), ומפעילים על הגוף הראשון כוח F_0 , על השני כוח $2F_0$ ועל השלישי כוח $3F_0$, תאוצת שלושת הגופים תהיה זהה וגודלה $a = F_0 / m_0$.



איור 3: אם הכוח הפועל על גופים שונים גדל באותו יחס שבין מסות גופים אלה, תאוצת הגופים תהיה זהה.

הערות:

1. לשם נוחות החישוב, נשתמש בקירוב $g = 10 \text{ m/s}^2$, לכן נקבל:

$$(12) \quad F_G = mg = 10m$$

2. אם נתון שכוח הכובד הפועל על גוף מסוים שווה לניוטון אחד, מסת גוף זה על פי הקשר הקודם שווה ל:

$$(13) \quad m = \frac{F_G}{g} = \frac{1 \text{ N}}{9.8 \text{ m/s}^2} = 0.102 \text{ kg} = 102 \text{ g}$$

לכן ניתן להגדיר כוח של ניוטון אחד ככוח הכובד הפועל על פני כדור הארץ על גוף שמסתו 102 g (ראה הגדרה בסעיף 2 בפרק 5).

דוגמאות חישוביות:

דוגמה 1

חשב את כוח הכובד הפועל על גוף שמסתו 2 kg :

- א. על פני כדור הארץ.
 ב. על פני הירח (תאוצת הכובד על פני הירח היא $g_{\text{Moon}} = 1.67\text{ m/s}^2$).
 ג. על פני השמש (תאוצת הכובד על פני השמש היא $g_{\text{Sun}} = 275\text{ m/s}^2$).

פתרון:

- א. על פני כדור הארץ:
 $F_G = mg = (2\text{ kg})(10\text{ m/s}^2) = 20\text{ N}$
 ב. על פני הירח:
 $F_G = mg_{\text{Moon}} = (2\text{ kg})(1.67\text{ m/s}^2) = 3.34\text{ N}$
 ג. על פני השמש:
 $F_G = mg_{\text{Sun}} = (2\text{ kg})(275\text{ m/s}^2) = 550\text{ N}$

דוגמה 2

נתון שכוח הכובד הפועל על גוף מסוים על פני הירח שווה ל- 334 N .

- א. חשב את מסת הגוף.
 ב. חשב את כוח הכובד שיפעל על הגוף על פני כדור הארץ.

פתרון:

א. מהקשר לכוח הכובד על פני הירח, נקבל: $F_G = mg_{\text{Moon}}$

$$m = \frac{F_G}{g_{\text{Moon}}} = \frac{334\text{ N}}{1.67\text{ m/s}^2} = 200\text{ kg}$$

ב. כוח הכובד שפועל על הגוף על פני כדור הארץ:

$$F_G = mg = (200\text{ kg})(10\text{ m/s}^2) = 2,000\text{ N}$$

3. בעיות בחוק השני של ניוטון

בעיה 1

כוח F שגודלו 30 N פועל בכיוון אנכי כלפי מעלה על גוף שמסתו $m = 2\text{ kg}$ המונח על משטח אופקי.

- א. בחר את הכיוון החיובי של ציר y כלפי מעלה וחשב את הכוח השקול הפועל על הגוף.
 ב. חשב את תאוצת הגוף.

פתרון:

א. מכיוון שגודלו של הכוח F גדול מגודלו של F_G , הגוף עולה כלפי מעלה בתאוצה, ולכן המשטח לא מפעיל כוח על הגוף (הכוח הנורמלי מתאפס).

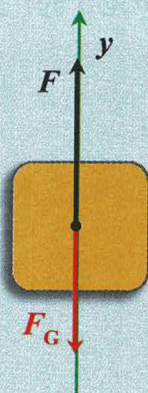
הכוחות הפועלים על הגוף במקרה זה הם: $F = 30\text{ N}$ כלפי מעלה, ו- $F_G = 20\text{ N}$ כלפי מטה, כפי שמתואר בתרשים הבא.

בהתאם לציר שנבחר (הכיוון החיובי כלפי מעלה) נקבל: $F = 30\text{ N}$ ו- $F_G = -20\text{ N}$. הכוח השקול הפועל על הגוף הוא:

$$\Sigma F_y = F + F_G = 30 + (-20) = 10\text{ N}$$

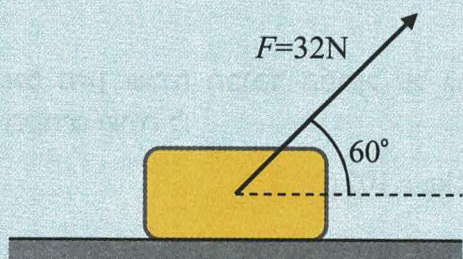
ב. על פי החוק השני של ניוטון מתקיים:

$$a_y = \frac{\Sigma F_y}{m} = \frac{10\text{ N}}{2\text{ kg}} = 5\text{ m/s}^2$$



בעיה 2

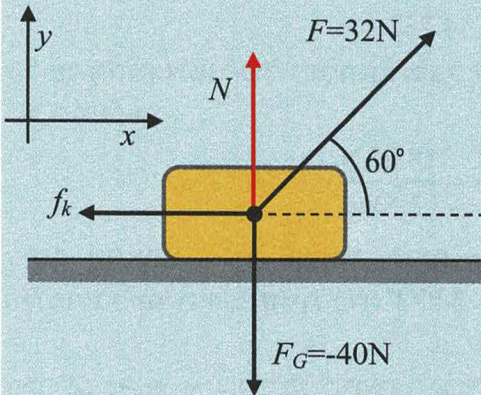
בתרשים הבא מתואר גוף שמסתו $m = 4\text{ kg}$ המונח על משטח אופקי וחלק. על הגוף פועל כוח שגודלו $F = 32\text{ N}$ ויוצר זווית בת 60° עם המשטח.



א. חשב את הכוח הנורמלי הפועל על הגוף.

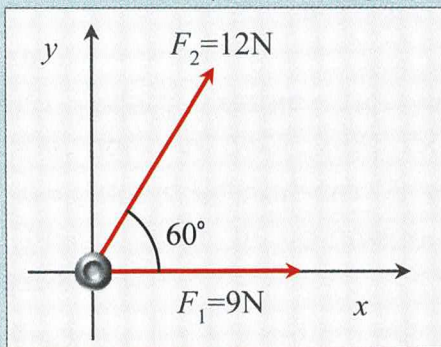
מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

$$= \frac{32 \cos 60 + (-4.916)}{4} = 2.77 \text{ m/s}^2$$



בעיה 3

בתרשים שלפניך מתואר במבט על גוף שמסתו $m = 2.5 \text{ kg}$ הנמצא על משטח אופקי וחלק ומערכת צירים xy במישור המשטח. על הגוף פועלים שני כוחות F_1 ו- F_2 הנמצאים במישור xy . גודלו של F_1 הוא 9 N והוא מכוון בכיוון החיובי של ציר x , וגודלו של F_2 הוא 12 N וכיוונו יוצר זווית בת 60° עם ציר x (ראה תרשים).



חשב את גודלה וכיוונה של תאוצת הגוף.

פתרון:

קיימות שתי דרכים לפתרון בעיה זו.
דרך 1: נחשב קודם את גודלו וכיוונו של הכוח השקול הפועל על הגוף.
מתקיים:

$$\Sigma F_x = F_1 + F_2 \cos 60 = 9 + 12 \cos 60 = 15 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y = F_2 \sin 60 = 12 \sin 60 = 10.4 \text{ N}$$

גודלו של הכוח השקול:

$$\Sigma F = \sqrt{(\Sigma F_x)^2 + (\Sigma F_y)^2} = \sqrt{15^2 + 10.4^2} = 18.25 \text{ N}$$

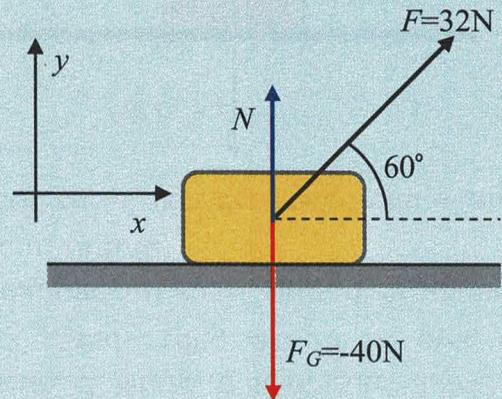
וכיוונו:

ב. חשב את תאוצת הגוף הנע על פני המשטח.

ג. ענה על סעיף ב' אם נתון שהמשטח אינו חלק ושמקדם החיכוך הקינטי בין הגוף למשטח הוא 0.4 .

פתרון:

א. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף: הכוח הנתון F , הכוח הנורמלי N וכוח הכובד F_G .



נבחר את מערכת הצירים xy המתוארת בתרשים. במערכת זו מתקיים:

$$F_G = -mg = -40 \text{ N}$$

מתקיים $F_y = 32 \sin 60 = 27.71 \text{ N}$, לכן מתקיים $|F_y| < |F_G|$. כתוצאה מכך הגוף נשאר על המשטח ופועל עליו כוח נורמלי כך על פי החוק הראשון מתקיים בכיוון ציר y :

$$F_y + N + F_G = 0$$

$$\Rightarrow 32(\sin 60) + N + (-40) = 0$$

$$\Rightarrow N = 12.29 \text{ N}$$

ב. בכיוון ציר x מתקיים החוק השני של ניוטון. על פי חוק זה נקבל:

$$a_x = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{F \cos 60}{m} = \frac{32 \cos 60}{4} = 4 \text{ m/s}^2$$

ג. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף במקרה זה כאשר:

$$f_k = -\mu_k N = -0.4(12.29) = -4.916 \text{ N}$$

החיכוך שלילי משום שהוא מכוון בכיוון השלילי של ציר x .

על פי החוק השני של ניוטון נקבל:

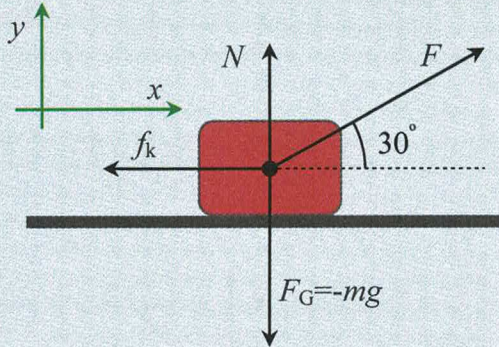
$$a_x = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{F_x + f_k}{m} =$$

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

($t=0$) ומצא את העתקו הכולל עד לזמן זה.

פתרון:

א. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף.



נבחר ציר y אנכי כלפי מעלה וציר x אופקי בכיוון התנועה.

מכיוון שבכיוון ציר y מתקיים $F \sin 30^\circ < F_G$ (נא לבדוק), נקבל שבכיוון זה פועל כוח נורמלי כך שמתקיים על פי החוק הראשון של ניוטון:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Rightarrow N + F \sin 30^\circ + F_G = 0$$

$$\Rightarrow N + 16 \sin 30^\circ + (-30) = 0 \Rightarrow N = 22 \text{ N}$$

כוח החיכוך הקינטי נתון על ידי:

$$f_k = -\mu_k N = -0.5(22) = -11 \text{ N}$$

כוח החיכוך שלילי בגלל שהוא מכיוון בכיוון השלילי של ציר x .

ב. על פי החוק השני של ניוטון נקבל בכיוון ציר x :

$$a_1 = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{F \cos 30^\circ + f_k}{m} = \frac{16 \cos 30^\circ + (-11)}{3} = 0.95 \text{ m/s}^2$$

ג. לאחר הפסקת פעולת הכוח, הגוף ממשיך לנוע בתאוצה על המשטח עקב פעולת כוח החיכוך הקינטי, עד לעצירה. במצב זה מתקיים $N = 30 \text{ N}$, והחיכוך במצב החדש הוא:

$$f_k = -\mu_k N = -0.5(30) = -15 \text{ N}$$

על פי החוק השני של ניוטון נקבל בכיוון ציר x :

$$a_2 = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{f_k}{m} = \frac{-15}{3} = -5 \text{ m/s}^2$$

$$\tan \alpha = \frac{\Sigma F_y}{\Sigma F_x} = \frac{10.4}{15}$$

$$\Rightarrow \alpha = 34.73^\circ$$

על פי החוק השני של ניוטון מתקבל שגודלה של התאוצה:

$$a = \frac{\Sigma F}{m} = \frac{18.25 \text{ N}}{2.5 \text{ kg}} = 7.3 \text{ m/s}^2$$

כיוון התאוצה הוא בכיוון הכוח השקול, כלומר בכיוון היוצר זווית בת 34.73° עם ציר x .

דרך 2: נמצא את רכיבי התאוצה בכיוון ציר x ובכיוון ציר y :

$$a_x = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{15}{2.5} = 6 \text{ m/s}^2$$

$$a_y = \frac{\Sigma F_y}{m} = \frac{10.4}{2.5} = 4.16 \text{ m/s}^2$$

לכן:

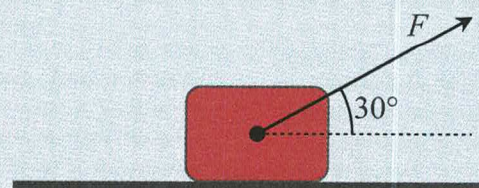
$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{6^2 + 4.16^2} = 7.3 \text{ m/s}^2$$

כיוון התאוצה:

$$\tan \alpha = \frac{a_y}{a_x} = \frac{4.16}{6} \Rightarrow \alpha = 34.73^\circ$$

בעיה 4

בתרשים שלפניך מתואר גוף שמסתו $m = 3 \text{ kg}$, המונח על משטח אופקי לא חלק. בזמן $t = 0$ מופעל על הגוף כוח F שגודלו 16 N ויוצר זווית בת 30° עם המשטח. הכוח נפסק ב- $t = 4 \text{ s}$.



נתון שמקדמי החיכוך הקינטי והסטטי בין הגוף והמשטח שווים, $\mu_s = \mu_k = 0.5$.

א. חשב את הכוח הנורמלי הפועל על הגוף ואת כוח החיכוך הקינטי הפועל עליו בפרק הזמן מ- $t = 0$ ועד $t = 4 \text{ s}$.

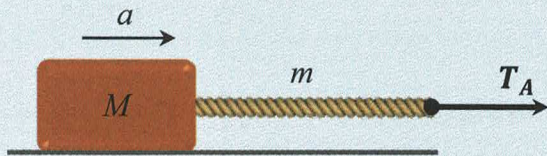
ב. חשב את תאוצת הגוף בפרק הזמן מ- $t = 0$ ועד $t = 4 \text{ s}$.

ג. חשב את תאוצת הגוף לאחר הפסקת הכוח F .

ד. מצא את הזמן שבו הגוף נעצר (ביחס ל- $t = 0$).

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

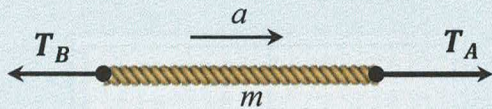
של ניוטון: $\Sigma F = ma$. נתייחס לחבל ולגוף כאל גוף אחד שמסתו $m+M$ שפועל עליו בכיוון אופקי כוח שגודלו T_A , כפי שמתואר בתרשים הבא:



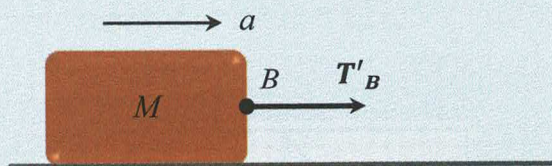
על פי החוק השני של ניוטון מתקיים:

$$T_A = (m+M)a$$

ב. בקצה B של החבל, הגוף מפעיל על החבל כוח T_B בכיוון שמאל כפי שמתואר בתרשים הבא:



ועל פי החוק השלישי של ניוטון החבל מפעיל על הגוף בקצה זה כוח T'_B השווה בגודלו והמנוגד בכיוונו ל- T_B כפי שמתואר בתרשים הבא:



על פי החוק השני של ניוטון מתקיים עבור הגוף:

$$T'_B = Ma$$

מכיוון שגודלו של T_B שווה ל- T'_B , נקבל ש:

$$T_B = Ma$$

(במשוואה האחרונה התייחסנו לגודל ללא הסימן).

ג. על פי הקשרים:

$$T_A = (m+M)a$$

$$T_B = Ma$$

נקבל:

$$T_A - T_B = (m+M)a - Ma$$

$$\Rightarrow T_A - T_B = ma$$

ד. קיבלנו בסעיף הקודם ש- $T_A - T_B = ma$, כאשר m היא מסת החבל ו- a תאוצת המערכת (תאוצת החבל).
על מנת להתקיים $T_A = T_B$, צריך להתקיים

ד. מהירות הגוף ב- $t=4s$ שווה ל:

$$v(4s) = v_{01} + a_1 t = 0 + 0.95(4) = 3.8 \text{ m/s}$$

נסמן מהירות זו ב- v_{02} . בשלב השני מהירות

הגוף כפונקציה של הזמן נתונה על ידי:

$$v = v_{02} + a_2(t-4)$$

$$\Rightarrow v = 3.8 - 5(t-4)$$

הגוף נעצר כאשר מהירותו בשלב השני של התנועה מתאפסת:

$$0 = 3.8 - 5(t-4) \Rightarrow t = 4.76s$$

ההעתק הכולל של הגוף:

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

כאשר Δx_1 הוא ההעתק בשלב הראשון של התנועה:

$$\Delta x_1 = v_{01}t + \frac{1}{2}a_1t^2 = 0 + \frac{1}{2}(0.95)(4)^2 = 7.6 \text{ m}$$

ו- Δx_2 הוא ההעתק בשלב השני של התנועה:

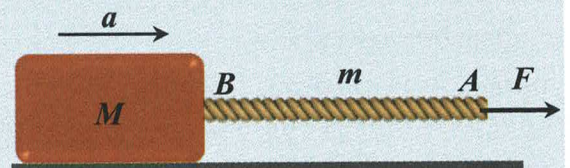
$$\Delta x_2 = \frac{v^2 - v_{02}^2}{2a_2} = \frac{0 - 3.8^2}{2(-5)} = 1.444 \text{ m}$$

לכן ההעתק הכולל הוא:

$$\Delta x = 7.6 + 1.444 = 9.044 \text{ m}$$

בעיה 5

גוף שמסתו M מונח על משטח אופקי וחלק, וקשור לקצה B של חבל שמסתו m . אוחזים בקצה האחר של החבל (הקצה A) ומפעילים עליו כוח אופקי F , וכתוצאה מכך הגוף מתחיל לנוע בתאוצה a (ראה תרשים).



א. בטא את המתיחות בקצה A של החבל (T_A) באמצעות הגדלים m , M ו- a .

ב. בטא את המתיחות בקצה B של החבל (T_B) באמצעות הגדלים m ו- a .

ג. מצא את הגודל $T_A - T_B$. הבע את תשובתך באמצעות הגדלים m ו- a .

ד. קבע מהם התנאים הנדרשים על מנת שיתקיים $T_A = T_B$ (המתיחות לאורך החוט אחידה).

פתרון:

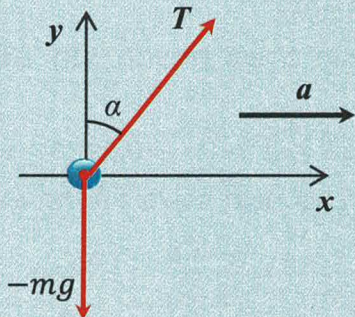
א. על מנת לחשב את המתיחות T_A נבחר את הכיוון החיובי בכיוון ימין וניעזר בחוק השני

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

פתרון:

א. הכוחות הפועלים על הגוף במצב המתואר בתרשים א' הם המתיחות בחוט T שכיוונה כלפי מעלה וכוח הכובד $F_G = mg$ כלפי מטה. על פי החוק הראשון של ניוטון מתקיים: $T = mg$.

ב. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף במקרה המתואר בתרשים ב', וזאת כאשר בחרנו ציר x בכיוון תאוצת הגוף, וציר y בכיוון אנכי.



מכיוון שבכיוון ציר y אין לגוף תאוצה, נקבל על פי החוק הראשון של ניוטון שבכיוון זה:

$$T \cos \alpha + (-mg) = 0$$

$$\Rightarrow T = \frac{mg}{\cos \alpha} \quad (1)$$

ג. על פי החוק השני של ניוטון מתקיים בכיוון ציר x :

$$\Sigma F_x = ma$$

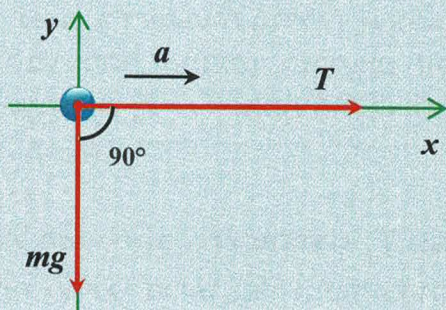
$$\Rightarrow T \sin \alpha = ma \quad (2)$$

נציב את המתיחות ממשוואה (1) במשוואה (2) ונקבל:

$$\frac{mg}{\cos \alpha} \sin \alpha = ma \Rightarrow a = g \tan \alpha$$

ד. לא קיים מצב שבו $\alpha = 90^\circ$. ניתן להסביר זאת בשתי דרכים:

דרך 1 (בשלילה): אם נניח ש- $\alpha = 90^\circ$ נקבל את תרשים הכוחות הבא:



$ma = 0$. תנאי זה מתקיים בתנאים הבאים:

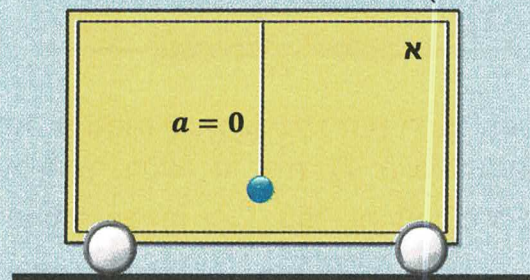
(1) $m = 0$, כלומר החבל חסר מסה.

(2) $a = 0$, כלומר המערכת נמצאת בשיווי משקל (במנוחה או בתנועה בקו ישר במהירות קבועה).

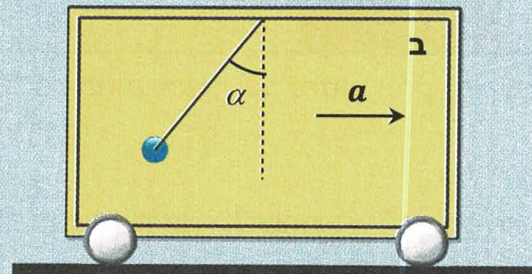
בעיה 6

בתרשים שלפניך מתוארת מערכת המשמשת כמד תאוצה מכני. המערכת מורכבת מעגלה הנמצאת על מישור אופקי. בתוכה נמצא גוף נקודתי שמסתו m הקשור לתקרת העגלה באמצעות חוט שמסתו זניחה.

כאשר תאוצת העגלה שווה לאפס, המערכת נמצאת בשיווי משקל והחוט ניצב לפני הקרקע (תרשים א').



כאשר העגלה נעה בתאוצה קבועה a , נוצרת זווית בין החוט לאנך (הזווית α בתרשים ב').



על ידי מדידת גודל הזווית α ניתן לחשב את תאוצת המערכת. ענה על השאלות הבאות:

א. מצא את המתיחות בחוט במצב המתואר בתרשים א'. בטא את תשובתך באמצעות הגדלים m ו- g .

ב. מצא את המתיחות בחוט במצב המתואר בתרשים ב'. בטא את תשובתך באמצעות הגדלים m , g ו- α .

ג. בטא את תאוצת המערכת המתוארת בתרשים ב' באמצעות הגדלים g ו- α .

ד. האם קיים מצב שבו $\alpha = 90^\circ$ (ראה תרשים ב')? הסבר את תשובתך.

ענה על השאלות הבאות:

- הסבר מדוע התלמיד העדיף לסרטט את התאוצה כפונקציה של הכוח ולא להפך, כלומר את הכוח כפונקציה של התאוצה.
- הסתמך על חוקי הפיזיקה ובטא את תאוצת הגוף a כפונקציה של הכוח F הפועל עליו. העזר בפרמטרים: m מסת הגוף ו- f_k החיכוך הקינטי בין הגוף למשטח.
- העזר בגרף ובקשר שקיבלת בסעיף הקודם וחשב את:
 - מסת הגוף.
 - החיכוך הקינטי שפעל על הגוף במהלך הניסוי.
 - מקדם החיכוך הקינטי בין הגוף למשטח.

פתרון:

- בניסוי זה התלמיד הפעיל כוחות שונים ומדד את התאוצה, לכן הכוח הוא המשתנה הבלתי תלוי והתאוצה היא המשתנה התלוי. בגרפים מוסכם לשרטט את המשתנה התלוי כפונקציה של המשתנה הבלתי תלוי, לכן התלמיד סרטט את a כפונקציה של F .
- נבחר את הכיוון החיובי בכיוון תנועת הגוף ונקבל על פי החוק השני של ניוטון:

$$a = \frac{\Sigma F}{m} = \frac{F - f_k}{m} \Rightarrow a = \left(\frac{1}{m}\right)F - \frac{f_k}{m}$$

ג.

- על פי הקשר שבסעיף הקודם מתקבל ששיפוע הגרף מייצג את הגודל $1/m$. שיפוע הגרף הנתון שווה ל-0.5. מכאן:

$$\frac{1}{m} = 0.5 \Rightarrow m = 2 \text{ kg}$$

- על פי הקשר שבסעיף ב', נקודת חיתוך הגרף עם הציר האנכי מייצגת את הגודל $-f_k/m$. על פי הגרף, נקודת חיתוך הגרף עם הציר האנכי היא -2. מכאן:

$$-\frac{f_k}{m} = -2 \Rightarrow -\frac{f_k}{2} = -2 \Rightarrow f_k = 4 \text{ N}$$

- מכיוון ש- $f_k = \mu_k N$, כאשר $N = mg = 20 \text{ N}$ נקבל:

$$4 = \mu_k (20) \Rightarrow \mu_k = 0.2$$

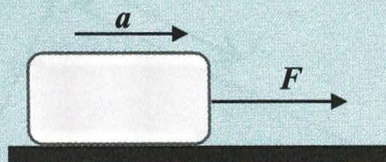
במצב המתואר בתרשים הקודם מתקיים ש- $\Sigma F_y \neq 0$ (בגלל שפועל בכיוון זה כוח יחיד שהוא mg), בזמן שמתקיים $a_y = 0$. כמובן, קיימת סתירה בין מצב זה לבין החוק השני של ניוטון.

דרך 2: ניעזר בקשר $a = g \tan \alpha$. על פי קשר זה התאוצה שעבורה $\alpha = 90^\circ$ שווה ל: $\alpha = g \tan 90 = \infty$

כלומר דרושה תאוצה אינסופית על מנת שנקבל $\alpha = 90^\circ$, וזה בלתי אפשרי.

בעיה 7

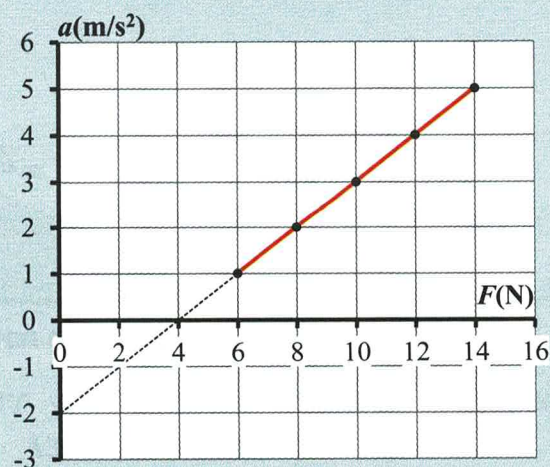
תלמיד עורך את הניסוי הבא: הוא מניח גוף שמסתו m לא ידועה על משטח אופקי לא חלק, מפעיל על הגוף כוח F בכיוון המקביל למשטח (כפי שמתואר בתרשים שלפניך) ומודד את תאוצת הגוף a .



התלמיד חוזר על הניסוי מספר פעמים, בכל פעם משנה את גודל הכוח F ומודד את התאוצה המתקבלת a . להלן התוצאות שקיבל התלמיד:

$a (\text{m/s}^2)$	$F (\text{N})$
1	6
2	8
3	10
4	12
5	14

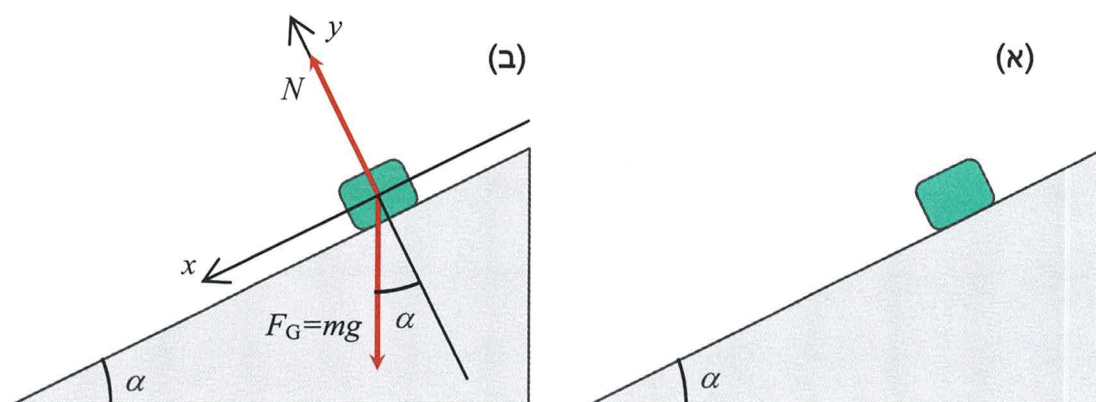
התלמיד שרטט גרף המתאר את תוצאות הניסוי וקיבל את הגרף הבא:



4. החוק השני של ניוטון בתנועה על מישור משופע

4.1 תנועה על מישור משופע חלק

מהניסיון היומיומי שלנו ידוע כי כאשר מניחים גוף על מישור משופע וחלק כפי שמתואר באיור 4א, הגוף יחליק וינע בתאוצה בכיוון מורד המישור המשופע. על מנת לנתח את תנועת הגוף על מישור משופע חלק שזווית השיפוע שלו α , נרשום את הכוחות הפועלים על הגוף ונבחר מערכת צירים xy מתאימה. הכוחות הפועלים על הגוף הם כוח הכובד $F_G = mg$ בכיוון ניצב לקרקע, והכוח הנורמלי N בכיוון הניצב למישור המשופע (ראה איור 4ב). לגבי מערכת הצירים, יש לבחור כתמיד, מערכת צירים נוחה. מערכת הצירים המתאימה ביותר לשימוש בחוק השני של ניוטון היא המערכת שבה אחד הצירים נמצא בכיוון התאוצה. נבחר את ציר x בכיוון התאוצה (בכיוון מקביל למישור המשופע) ואת ציר y ניצב למישור המשופע (ראה איור 4ב).

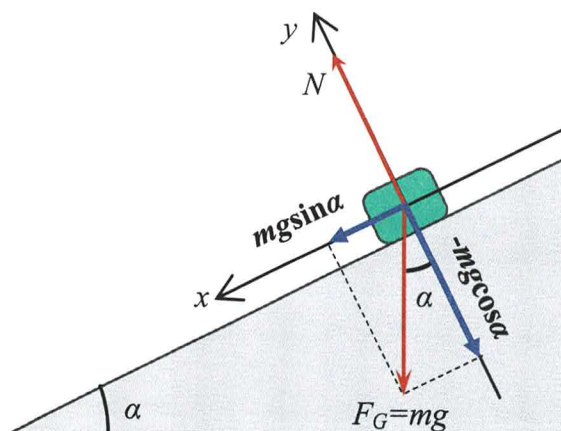


איור 4: (א) גוף מונח על מישור משופע חלק. (ב) הכוחות הפועלים על הגוף המונח על מישור משופע חלק ומערכת הצירים המתאימה.

במערכת צירים זו הכוח F_G יוצר עם הכיוון השלילי של ציר y זווית השווה לזווית השיפוע של המישור המשופע, α (ראה איור 4ב). לכן לכוח הכובד יש במערכת זו שני רכיבים כפי שמתואר באיור 5, והם:

$$(14) \quad F_{Gx} = mg \sin \alpha$$

$$(15) \quad F_{Gy} = -mg \cos \alpha$$



איור 5: רכיבי כוח הכובד במערכת הצירים שנבחרה.

מכיוון שתאוצת הגוף מכוונת בכיוון ציר x , בכיוון ציר y אין תאוצה ומתקיים החוק הראשון של ניוטון. לכן בכיוון זה מתקיים: $\Sigma F_y = N + (-mg \cos \alpha) = 0$. מקשר זה מתקבל:

(16)

$$N = mg \cos \alpha$$

בכיוון ציר x מתקיים החוק השני של ניוטון. לכן בכיוון זה מתקיים:

(17)

$$a = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{mg \sin \alpha}{m} = g \sin \alpha$$

תוצאות ומסקנות:

1. תאוצת הגופים הנעים על מישור משופע חלק נתונה על ידי $g \sin \alpha$.
2. תאוצה זו אינה תלויה במסת הגוף. היא תלויה רק בתאוצת הכובד g ובזווית שיפוע המישור, α . לכן תאוצת גופים שונים על אותו מישור משופע חלק היא זהה.
3. ככל שזווית השיפוע של המישור המשופע גדלה, תאוצת הגוף גדלה. הערך המקסימלי של התאוצה מתקבל כאשר $\alpha = 90^\circ$, כלומר כאשר המישור ניצב לפני הקרקע. במקרה זה נקבל $a = g$ שהיא תאוצת הנפילה החופשית.
4. ככל שזווית השיפוע של המישור המשופע קטנה, תקטן תאוצת הגוף. הערך המינימלי של התאוצה מתקבל כאשר $\alpha = 0$. במקרה זה המישור המשופע אופקי ומתקיים $a = 0$.

דוגמאות לתנועה על מישור משופע וחלק

דוגמה 1

גוף שמסתו 2 kg מחליק על מישור משופע וחלק שזווית השיפוע שלו 30° . חשב את תאוצת הגוף ואת הכוח הנורמלי הפועל עליו.

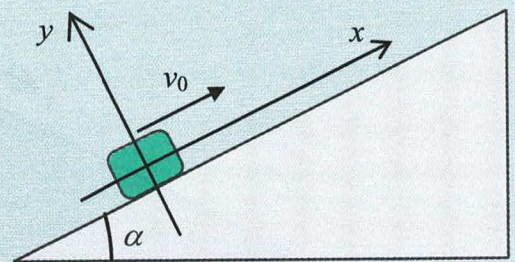
פתרון: על פי הקשרים (16) ו-(17) נקבל:

$$N = mg \cos 30 = 20 \cos 30 = 17.32 \text{ N}$$

$$a = g \sin \alpha = 10 \sin 30 = 5 \text{ m/s}^2$$

דוגמה 2

מניחים גוף על מישור משופע וחלק שזווית השיפוע שלו 30° , וברגע $t = 0$ מעניקים לו מהירות התחלתית של 4 m/s בכיוון מעלה המישור, כפי שמתואר בתרשים הבא:



בחר ציר x בכיוון מקביל למישור המשופע וכיוונו החיובי בכיוון מעלה המישור המשופע, ציר y ניצב למישור המשופע וראשית הצירים בנקודה שבה הגוף נמצא ב- $t = 0$ (ראה תרשים), וענה על השאלות הבאות:

- א. חשב את תאוצת הגוף.
- ב. חשב את הזמן הדרוש לגוף עד שיעצר רגעית על המישור המשופע.

ג. חשב את מיקום הנקודה שבה הגוף נעצר רגעית.

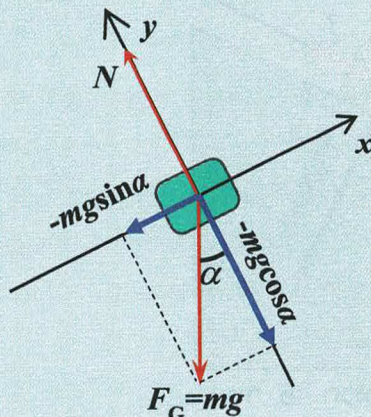
ד. חשב את תאוצת הגוף בדרך חזרה.

ה. מצא את הזמן (ביחס ל- $t = 0$) שבו הגוף חוזר לנקודת המוצא.

ו. חשב את מהירות הגוף בזמן חזרתו לנקודת המוצא.

פתרון:

א. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף ומערכת הצירים שבחרנו:



על פי החוק השני של ניוטון נקבל שתאוצת הגוף:

$$a = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{F_{Gx}}{m} = \frac{-mg \sin \alpha}{m} = -g \sin \alpha = -5 \text{ m/s}^2$$

ב. ניעזר בקשר $v = v_0 + at$. כאשר הגוף עוצר רגעית מתקיים $v = 0$. נציב ונקבל:

$$0 = 4 - 5t \Rightarrow t = 0.8 \text{ s}$$

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

בקשר: $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$, כאשר $x_0 = 0$, $v_0 = 4 \text{ m/s}$ ו- $a = -5 \text{ m/s}^2$:

$$0 = 0 + 4t - \frac{1}{2}(-5)t^2$$

$$\Rightarrow t(t - 1.6) = 0$$

מהמשוואה האחרונה נקבל שני פתרונות: $t_1 = 0$ ו- $t_2 = 1.6 \text{ s}$. נבחר בפתרון השני.

$$v = v_0 + at$$

$$\Rightarrow v(1.6 \text{ s}) = 4 - 5(1.6 \text{ s}) = -4 \text{ m/s}$$

ג. נעזר בקשר $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ ונקבל:

$$x(0.8 \text{ s}) = (4)(0.8) + \frac{1}{2}(-5)(0.8)^2 = 1.6 \text{ m}$$

ד. תאוצת הגוף בדרך חזרה שווה לתאוצתו בעלייה:

$$a = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{F_{Gx}}{m} = \frac{-mg \sin \alpha}{m} = -g \sin \alpha = -5 \text{ m/s}^2$$

ה. מכיוון שהגוף חוזר באותה תאוצה נקבל שזמן הירידה שווה לזמן העלייה, לכן הגוף חוזר לנקודת המוצא ב- $t = 1.6 \text{ s}$.

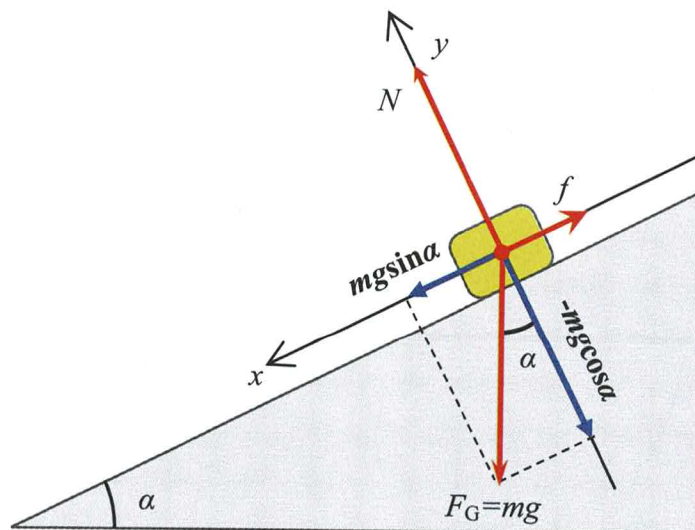
ניתן להראות זאת גם על ידי הצבת $x = 0$

4.2 תנועה על מישור משופע לא חלק

מניחים גוף שמסתו m על מישור משופע לא חלק. נתון שזווית שיפוע המישור היא α ושמקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף למשטח הם μ_s ו- μ_k , בהתאמה. לניתוח בעיה זו נבחר מערכת צירים xy שבה ציר x מקביל למישור המשופע וכיוונו החיובי בכיוון מורד המישור המשופע וציר y מאונך למישור המשופע, כפי שמתואר באיור 6. באיור זה מוצגים גם הכוחות הפועלים על הגוף, כאשר f מייצג את כוח החיכוך.

בכיוון ציר y מתקיים שיווי משקל, לכן נקבל על פי החוק הראשון של ניוטון:

$$(18) \quad N = mg \cos \alpha$$



איור 6: הכוחות הפועלים על גוף המונח על מישור משופע לא חלק ומערכת הצירים המתאימה.

בכיוון ציר x קיימות שתי אפשרויות:

אפשרות 1: אם מתקיים ש- $F_{Gx} \leq f_{s \max}$, כאשר $F_{Gx} = mg \sin \alpha$ ו- $f_{s \max} = \mu_s N = \mu_s mg \cos \alpha$ הוא הערך המקסימלי עבור החיכוך הסטטי בין הגוף למשטח, הגוף נשאר במנוחה. כלומר אם מתקיים התנאי:

$$(19) \quad mg \sin \alpha \leq \mu_s mg \cos \alpha$$

שממנו מתקבל התנאי:

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

$$(20) \quad \tan \alpha \leq \mu_s$$

הגוף נשאר במנוחה על המישור המשופע. במקרה זה פועל על הגוף כוח חיכוך סטטי f_s בכיוון מעלה המישור המשופע. כוח זה מתקבל על ידי שימוש בחוק הראשון של ניוטון בכיוון ציר x :

$$(21) \quad \Sigma F_x = f_s + mg \sin \alpha = 0 \Rightarrow f_s = -mg \sin \alpha$$

החיכוך הסטטי שלילי כי הוא מכוון בכיוון השלילי של ציר x .

אפשרות 2: אם הרכיב $mg \sin \alpha$ גדול מהערך המקסימלי של החיכוך הסטטי, $f_{s \max} = \mu_s mg \cos \alpha$, הגוף נע בתאוצה במורד המישור המשופע. כלומר אם מתקיים התנאי:

$$(22) \quad mg \sin \alpha > \mu_s mg \cos \alpha$$

שממנו מתקבל התנאי:

$$(23) \quad \tan \alpha > \mu_s$$

הגוף נע בתאוצה במורד המישור המשופע. לחישוב תאוצה זו ניעזר בחוק השני של ניוטון, ממנו מתקבל:

$$(24) \quad a = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{F_{Gx} + f_k}{m}$$

כאשר $F_{Gx} = mg \sin \alpha$ ו- $f_k = -\mu_k N = -\mu_k mg \cos \alpha$ (החיכוך שלילי כי הוא מכוון בכיוון השלילי של ציר x). נציב את הגדלים במשוואה (24) ונקבל:

$$(25) \quad a = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{mg \sin \alpha - \mu_k mg \cos \alpha}{m} = g(\sin \alpha - \mu_k \cos \alpha)$$

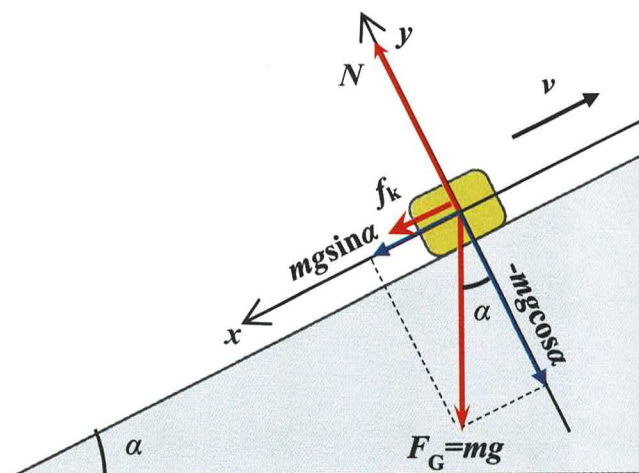
תוצאות ומסקנות:

1. תאוצת הגוף על מישור משופע לא חלק אינה תלויה במסת הגוף, אלא בזווית השיפוע α , בתאוצת הכובד g ובמקדם החיכוך הקינטי μ_k , בלבד.
2. אם המשטח חלק ($\mu_k = 0$) נקבל מהביטוי (25) ש- $a = g \sin \alpha$.

יש לשים לב שבמקרה שבו המישור המשופע אינו חלק, תאוצת הגוף כאשר הגוף נע במעלה

המישור המשופע שונה מתאוצתו כאשר הוא נע במורד המישור המשופע, וזאת בגלל שכיוון כוח החיכוך תלוי בכיוון תנועת הגוף. משוואה (25) מתארת את תאוצת הגוף כאשר הוא נע במורד המישור המשופע.

נבטא כעת את תאוצת הגוף כאשר הוא נע בכיוון מעלה המישור המשופע. על מנת לבטא את תאוצת הגוף במקרה זה, נשרטט את הכוחות הפועלים עליו כשהוא נע במעלה המישור המשופע. באיור 7 מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף כאשר הוא נע לאורך המישור המשופע כלפי מעלה, כשבחרנו את אותה מערכת צירים כמו קודם.



איור 7: הכוחות הפועלים על גוף הנע במעלה מישור משופע לא חלק.

על פי החוק השני של ניוטון נקבל בכיוון ציר x :

$$(26) \quad a = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{+mg \sin \alpha + \mu_k mg \cos \alpha}{m} = g(\sin \alpha + \mu_k \cos \alpha)$$

שים לב שבמערכת הצירים שבחרנו גם החיכוך הקינטי וגם F_{Gx} חיוביים (ראה איור 7).

דוגמאות לתנועה על מישור משופע לא חלק

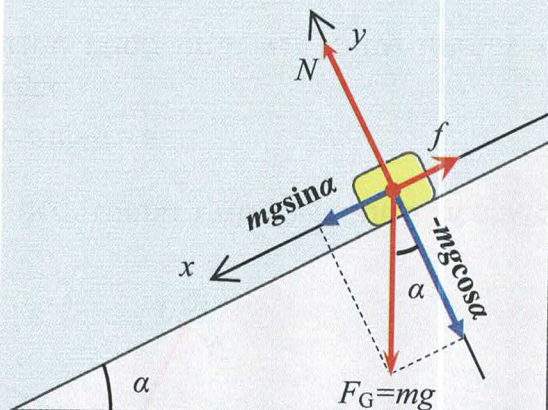
דוגמה 1

מניחים גוף שמסתו 3 kg על מישור משופע לא חלק. נתון שזווית השיפוע של המישור המשופע 30° ושמקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף למשטח הם 0.7 ו- 0.4 , בהתאמה.

- חשב את הכוח הנורמלי הפועל על הגוף.
- חשב את גודלו של החיכוך הסטטי המקסימלי האפשרי בין הגוף למשטח.
- קבע האם הגוף נע על המישור המשופע או נשאר במנוחה. אם הוא נע חשב את תאוצתו, ואם הוא נשאר במנוחה חשב את כוח החיכוך הסטטי שפועל עליו.

פתרון:

- בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף ומערכת הצירים xy שבחרנו. הכוח f הוא כוח החיכוך הפועל על הגוף.



על פי החוק הראשון של ניוטון בכיוון ציר y מתקבל:

$$\Sigma F_y = N + (-mg \cos \alpha) = 0$$

$$\Rightarrow N = mg \cos \alpha = 30 \cos 30 = 26 \text{ N}$$

$$f_{s \max} = \mu_s N = 0.7(26) = 18.2 \text{ N. ב.}$$

- רכיב כוח הכובד הפועל על הגוף במורד המישור המשופע נתון על ידי:

$$F_{Gx} = mg \sin \alpha = 30 \sin 30 = 15 \text{ N}$$

מכיוון שמתקיים $F_{Gx} < f_{s \max}$, הגוף נשאר במנוחה. במקרה זה פועל עליו כוח חיכוך סטטי f_s בכיוון מעלה המישור המשופע. על פי החוק הראשון של ניוטון מתקיים:

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Rightarrow mg \sin \alpha + f_s = 0$$

$$\Rightarrow f_s = -mg \sin \alpha = -15 \text{ N}$$

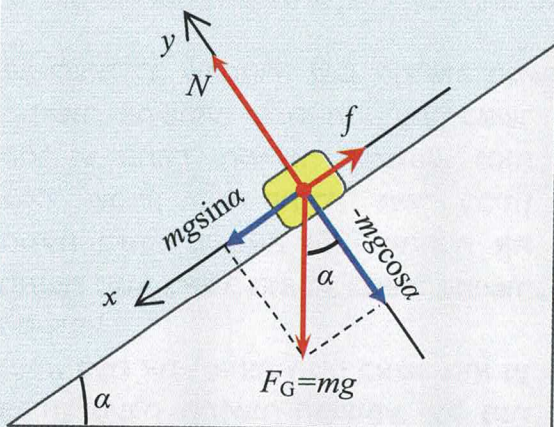
דוגמה 2

מניחים גוף שמסתו 2 kg על מישור משופע לא חלק. נתון שזווית השיפוע של המישור המשופע 60° ושמקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף למשטח הם 0.8 ו- 0.5 , בהתאמה.

- חשב את הכוח הנורמלי הפועל על הגוף.
- חשב את גודלו של החיכוך הסטטי המקסימלי האפשרי בין הגוף למשטח.
- קבע האם הגוף נע על המישור המשופע או נשאר במנוחה. אם הוא נע חשב את תאוצתו, ואם נשאר במנוחה חשב את כוח החיכוך הסטטי שפועל עליו.

פתרון:

- בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף ומערכת הצירים שבחרנו:



על פי החוק הראשון של ניוטון מתקיים בכיוון ציר y :

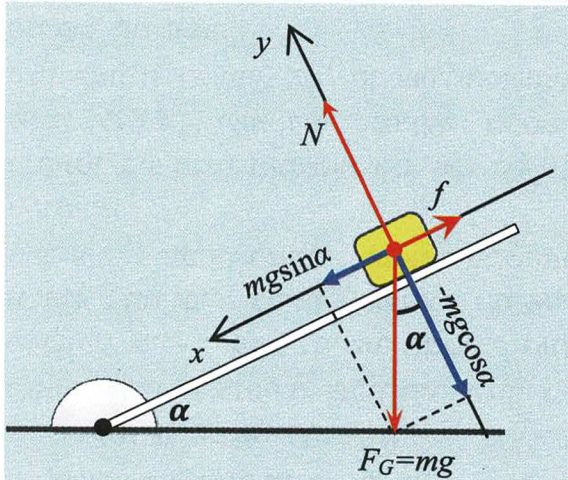
$$N = mg \cos \alpha = 20 \cos 60 = 10 \text{ N}$$

$$f_{s \max} = \mu_s N = 0.8(10) = 8 \text{ N. ב.}$$

- רכיב כוח הכובד הפועל על הגוף במורד המישור המשופע נתון על ידי:

$$F_{Gx} = mg \sin \alpha = 20 \sin 60 = 17.32 \text{ N}$$

מכיוון שמתקיים $F_{Gx} > f_{s \max}$, הגוף נע במורד המישור המשופע בתאוצה. במקרה זה



א. במצב שבו הגוף נמצא על סף תנועה, פועל עליו כוח חיכוך סטטי $f_{s \max}$ בכיוון מעלה המישור המשופע. כוח זה נתון על ידי:

$$f_{s \max} = -\mu_s N = -\mu_s mg \cos \alpha_1$$

(החיכוך שלילי כי הוא מכוון בכיוון השלילי של ציר x). על פי החוק הראשון מתקיים במקרה זה בכיוון ציר x :

$$\Sigma F_x = F_{Gx} + f_{s \max} = 0$$

$$\Rightarrow mg \sin \alpha_1 + (-\mu_s mg \cos \alpha_1) = 0$$

$$\Rightarrow \tan \alpha_1 = \mu_s$$

ב. כאשר מגדילים את הזווית מעל α_1 הגוף נע בתאוצה בכיוון מורד המישור המשופע. הכוחות הפועלים עליו במקרה זה בכיוון ציר x הם: $F_{Gx} = mg \sin \alpha$ בכיוון מורד המישור המשופע, ובכיוון מעלה המישור המשופע החיכוך הקינטי $f_k = \mu_k mg \cos \alpha$ כך שמתקיים $F_{Gx} > f_k$. כאשר מקטינים את הזווית α בהדרגה, F_{Gx} קטן ו- f_k גדל. במצב שבו מתקיים $F_{Gx} = f_k$ הגוף נע במהירות קבועה. אם נסמן את הזווית שעבורה מתקיים מצב זה ב- α_2 נקבל:

$$mg \sin \alpha_2 = \mu_k mg \cos \alpha_2 \Rightarrow \tan \alpha_2 = \mu_k$$

ג.

$$\tan \alpha_1 = 1 \Rightarrow \alpha_1 = 45^\circ$$

$$\tan \alpha_2 = 0.6 \Rightarrow \alpha_2 = 31^\circ$$

דוגמה 3

מניחים גוף שמסתו 2kg על מישור משופע לא חלק וברגע $t=0$ מקנים לו מהירות התחלתית שגודלה 9.5m/s בכיוון מעלה

פועל עליו כוח חיכוך קינטי בכיוון מעלה המישור המשופע הנתון על ידי:

$$f_k = -\mu_k N = -0.5(10) = -5 \text{ N}$$

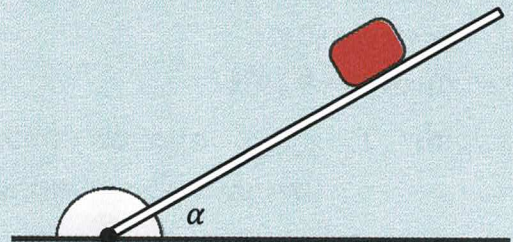
f_k שלילי כי הוא מכוון בכיוון השלילי של ציר x .

על פי החוק השני של ניוטון מתקבל:

$$a = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{F_{Gx} + f_k}{m} = \frac{17.32 - 5}{2} = 6.16 \text{ m/s}^2$$

דוגמה 3

מניחים גוף על מישור משופע שניתן לשנות את זווית השיפוע שלו כפי שמתואר בתרשים שלפניך.



נתון שמקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף למשטח הם μ_s ו- μ_k , בהתאמה ($\mu_k < \mu_s$).

א. מתחילים להגדיל את זווית השיפוע של המישור המשופע (α) עד לזווית α_1 , שעבורה הגוף נמצא על סף תנועה. מצא את הזווית α_1 . בטא את תשובתך באמצעות μ_s .

ב. מגדילים את שיפוע המישור המשופע לזווית גדולה יותר מ- α_1 . הגוף מתחיל לנוע בתאוצה במורד המישור המשופע. לאחר מכן מתחילים להקטין את זווית השיפוע בהדרגה עד לזווית α_2 שבה הגוף מחליק במהירות קבועה במורד המישור המשופע. מצא את α_2 . בטא את תשובתך באמצעות μ_k .

ג. חשב את α_1 ו- α_2 עבור $\mu_s = 1$ ו- $\mu_k = 0.6$.

פתרון:

בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף ומערכת הצירים שבחרנו כאשר f הוא כוח החיכוך הפועל על הגוף.

$$= -g(\sin \alpha + \mu_k \cos \alpha) =$$

$$= -10(\sin 40 + 0.4 \cos 60) = -9.5 \text{ m/s}^2$$

ב. ניעזר בקשר $v = v_0 + a_1 t$. הגוף נעצר בזמן t_1 שעבורו מתקיים $v = 0$. נציב ונקבל:

$$0 = 9.5 - 9.5 t_1 \Rightarrow t_1 = 1 \text{ s}$$

$$\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0 - 9.5^2}{2(-9.5)} = 4.75 \text{ m}$$

ד. על מנת להראות שהגוף חוזר בחזרה לאחר שהוא נעצר, צריכים להראות ש: $F_{Gx} > f_{s \max}$. מתקיים:

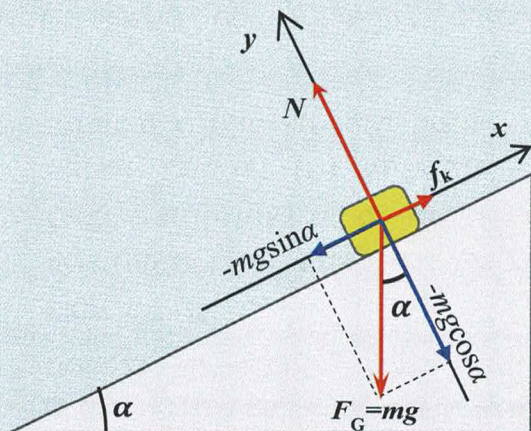
$$F_{Gx} = mg \sin 40 = 20 \sin 40 = 12.85 \text{ N}$$

$$f_{s \max} = \mu_s mg \cos 40 =$$

$$= 0.6(20) \cos 40 = 9.19 \text{ N}$$

מכיוון שמתקיים $F_{Gx} > f_{s \max}$, נסיק מכך שהגוף חוזר לאחר עצירתו.

ה. הכוחות הפועלים על הגוף במהלך חזרתו הם הכוחות המתוארים בתרשים הבא:



על פי החוק השני של ניוטון מתקיים בכיוון ציר x:

$$a = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{F_{Gx} + f_k}{m} =$$

$$= \frac{-mg \sin \alpha + \mu_k mg \cos \alpha}{m} =$$

$$= -g(\sin \alpha - \mu_k \cos \alpha) =$$

$$= -10(\sin 40 - 0.4 \cos 40) = -3.36 \text{ m/s}^2$$

ו. לחישוב זמן החזרה, ניעזר בקשר:

$$x = x_{02} + v_{02}(t-1) + \frac{1}{2} a_2 (t-1)^2$$

כאשר $v_{02} = 0$, $x_{02} = 4.75 \text{ m}$ ו-1

המישור המשופע.

נתון שזווית השיפוע של המישור המשופע שווה ל- 40° , ושמקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף והמשטח הם 0.6 ו-0.4, בהתאמה.

בחר ציר x בכיוון המקביל למישור המשופע וכיוונו החיובי בכיוון מעלה המישור המשופע, ציר y ניצב למישור המשופע ואת ראשית הצירים בנקודה שבה היה הגוף ב- $t = 0$ וענה על השאלות הבאות:

א. חשב את תאוצת הגוף בעליה, a_1 .

ב. חשב את הזמן הדרוש לגוף עד שייעצר.

ג. חשב את מיקום הנקודה שבה הגוף נעצר.

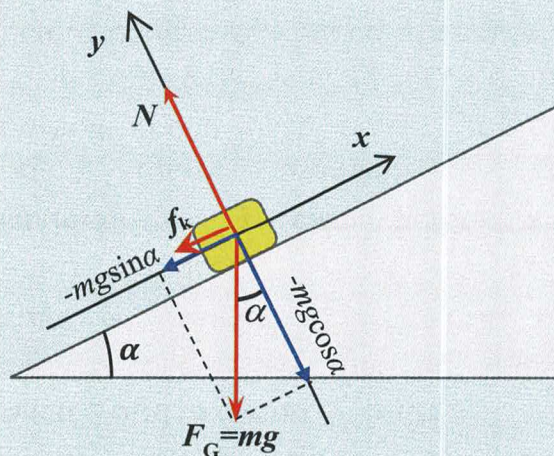
ד. הראה שלאחר עצירתו, הגוף שב ויורד במורד המישור.

ה. חשב את תאוצת הגוף בתנועתו במורד המישור, a_2 .

ו. מצא את הזמן שבו הגוף חוזר לראשית (יחסית ל- $t = 0$) ואת מהירותו בזמן זה.

פתרון:

א. הכוחות הפועלים על הגוף במהלך עלייתו הם: F_G , N ו- f_k . בתרשים הבא מתוארים כוחות אלה ומערכת הצירים xy שבחרנו.



במערכת זו מתקיים:

$$f_k = -\mu_k N = -\mu_k mg \cos \alpha$$

(f_k שלילי כי הוא מכוון בכיוון השלילי של ציר x).

על פי החוק השני של ניוטון מתקיים בכיוון ציר x:

$$a_1 = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{-mg \sin \alpha - \mu_k mg \cos \alpha}{m} =$$

לחישוב המהירות בשלב ההחזרה:

$$\begin{aligned} v &= v_{02} + a_2(t-1) \\ \Rightarrow v(2.68s) &= 0 - 3.36(2.68-1) \\ \Rightarrow v &= -5.65 \text{ m/s} \end{aligned}$$

הגוף חוזר לנקודת המוצא $a = -3.36 \text{ m/s}^2$. בזמן t_2 שעבורו $x = 0$. נציב ונקבל:

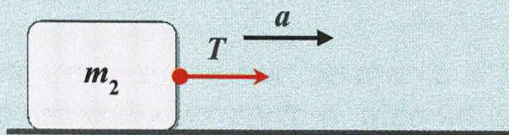
$$\begin{aligned} 0 &= 4.75 + 0(t_2 - 1) + \frac{1}{2}(-3.36)(t_2 - 1)^2 \\ \Rightarrow \frac{1}{2}(3.36)(t_2 - 1)^2 &= 4.75 \Rightarrow t_2 = 2.68 \text{ s} \end{aligned}$$

לחישוב מהירות הגוף בזמן t_2 , נעזר בקשר

5. החוק השני של ניוטון במערכות המורכבות משני גופים הנעים באותה תאוצה

בסעיף זה נדון בשימוש בחוק השני של ניוטון לניתוח הדינמיקה של מערכות שונות המורכבות משני גופים הנעים, כתוצאה מפעולת כוח חיצוני, בתאוצה זהה.

לדוגמה, על גוף 2 פועל בכיוון אופקי רק כוח המתיחות T כפי שמתואר בתרשים הבא:



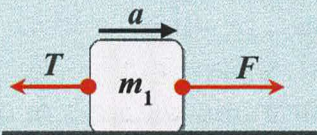
מכיוון שגוף זה נע בתאוצה a שחישובו מקודם, נקבל על פי החוק השני של ניוטון:

$$T = m_2 a$$

נציב a ונקבל:

$$T = \frac{m_2 F}{m_1 + m_2}$$

ניתן לחשב את T גם באמצעות שימוש בחוק השני של ניוטון עבור גוף 1. על גוף זה פועלים בכיוון התנועה הכוחות F ו- T (ראו תרשים הבא):



על פי החוק השני של ניוטון מתקיים:

$$\begin{aligned} F - T &= m_1 a \\ \Rightarrow T &= F - m_1 a \end{aligned}$$

נציב את התאוצה ונקבל:

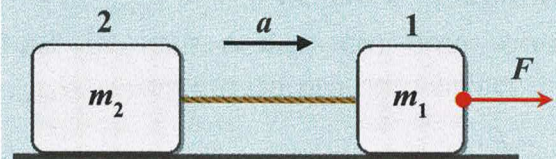
$$T = F - \frac{m_1 F}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 F}{m_1 + m_2}$$

דרך 2: נתייחס לכל אחד משני הגופים בנפרד. נרשום את הכוחות הפועלים על כל אחד משני הגופים ונרשום את החוק השני של ניוטון לכל אחד מהם.

הכוחות הפועלים על כל אחד משני הגופים בכיוון התנועה הם הכוחות המתוארים

בעיה 1

במערכת שלפניך מתוארים שני גופים 1 ו-2 המונחים על משטח אופקי וחלק והקשורים זה לזה באמצעות חוט שמסתו זניחה. מפעילים כוח אופקי F קבוע על גוף 1, וכתוצאה מכך המערכת נעה בתאוצה קבועה (ראה תרשים).



נתון שמסת הגוף 1 היא m_1 ושמסת הגוף 2 היא m_2 .

בטא את תאוצת המערכת, a , ואת המתיחות בחוט, T , באמצעות m_1 , m_2 ו- F (כולם או חלקם).

פתרון:

קיימות שתי דרכים לטיפול בבעיה זו.

דרך 1: נתייחס למערכת שני הגופים כאל גוף אחד שמסתו $M = m_1 + m_2$ המונח על משטח אופקי וחלק ופועל עליו כוח אופקי F . על פי החוק השני של ניוטון תאוצת גוף זה (הזהה לתאוצת המערכת כולה) נתונה על ידי:

$$a = \frac{F}{M} = \frac{F}{m_1 + m_2}$$

המתיחות בחוט (T) קבועה משום שמסת החוט זניחה.

לחישוב המתיחות בחוט, נרשום את הכוחות הפועלים על אחד משני הגופים בכיוון התנועה וניעזר בחוק השני של ניוטון.

ב. חשב את גודלו של הכוח F שעבורו המערכת נמצאת על סף תנועה.

ג. חשב את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט אם הכוח F גדול פי 2 מהכוח שחישבת בסעיף הקודם.

פתרון:

א. החיכוך הסטטי המקסימלי האפשרי בין הגוף הראשון למשטח הוא:

$$f_{s\max 1} = \mu_s N_1 = \mu_s m_1 g = 0.6(20) = 12 \text{ N}$$

החיכוך הסטטי המקסימלי האפשרי בין הגוף השני למשטח הוא:

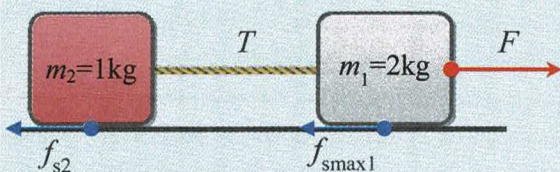
$$f_{s\max 2} = \mu_s N_2 = \mu_s m_2 g = 0.6(10) = 6 \text{ N}$$

ב. אם נפעיל על הגוף הראשון כוח F , כוח שגדל בהדרגה מאפס, אז, הגוף לא ינוע והמתיחות בחוט תישאר אפס כל עוד הכוח קטן מ- $f_{s\max 1} = 12 \text{ N}$.

אם נפעיל על הגוף הראשון כוח F המקיים $F > f_{s\max 1} = 12 \text{ N}$ והמערכת עדיין במנוחה, יפעל על הגוף הראשון כוח חיכוך סטטי $f_{s\max 1}$, ובנוסף כוח מתיחות בחוט שגודלו:

$$T = F - f_{s\max 1}$$

(ראה תרשים). כתוצאה מהמתיחות בחוט, יפעל על הגוף השני כוח חיכוך סטטי f_{s2} המקיים: $f_{s2} = T$, כפי שמתואר בתרשים הבא:

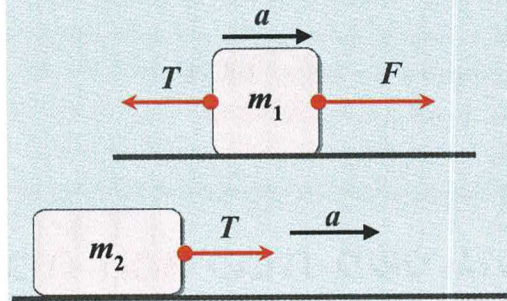


אם נמשיך בהגדלת הכוח F , המתיחות בחוט תגדל וגם f_{s2} . כאשר מגיעים למצב שבו $T = f_{s\max 2}$, המערכת תהיה על סף תנועה. הכוח F במקרה זה הוא הכוח שעבורו המערכת נמצאת על סף תנועה, והוא נתון על ידי:

$$F = f_{s\max 1} + T = f_{s\max 1} + f_{s\max 2} = 12 + 6 = 18 \text{ N}$$

ג. נתון כעת ש- $F = 36 \text{ N}$. מכיוון שמתקיים $F > F_{\max}$ המערכת תנוע, ובין הגופים והמשטח יפעל חיכוך קינטי, כך שמתקיים:

בתרשים הבא:



על פי החוק השני של ניוטון מתקבל עבור הגוף הראשון: $F - T = m_1 a$, ועבור הגוף השני: $T = m_2 a$.

קיבלנו את המשוואות הבאות:

$$\begin{cases} F - T = m_1 a \\ T = m_2 a \end{cases}$$

שהן שתי משוואות בשני נעלמים (T ו- a). על מנת למצוא את הנעלמים, נחבר את שתי המשוואות ונקבל:

$$F - T + T = (m_1 + m_2) a$$

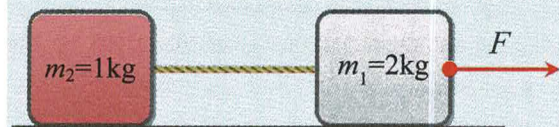
$$\Rightarrow a = \frac{F}{m_1 + m_2}$$

על מנת למצוא את T , נציב את התאוצה באחת המשוואות למעלה. אם נציב במשוואה השנייה נקבל:

$$T = m_2 a = \frac{m_2 F}{m_1 + m_2}$$

בעיה 2

בתרשים שלפניך מתוארים שני גופים המונחים על משטח אופקי לא חלק והמחוברים זה לזה בחוט שמסתו זניחה.



נתון שמסת הגוף הראשון היא $m_1 = 2 \text{ kg}$ ומסת הגוף השני היא $m_2 = 1 \text{ kg}$. מקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין שני הגופים והמשטח הם 0.6 ו-0.2, בהתאמה.

מפעילים על הגוף הראשון כוח אופקי F (ראה תרשים).

א. חשב את ערכו של החיכוך הסטטי המקסימלי האפשרי בין כל אחד משני הגופים והמשטח.

זה בזה.

ג. ענה על סעיף א' אם נתון שהמשטח לא חלק ושמקדם החיכוך הקינטי בין כל אחד משני הגופים והמשטח הוא μ_k .

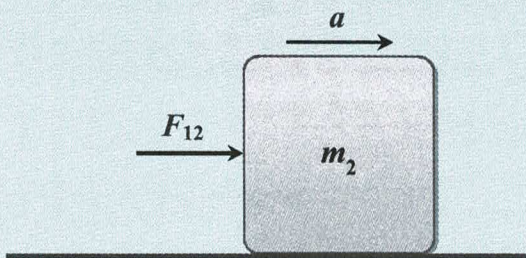
פתרון:

א.

(1) על פי החוק השני של ניוטון נקבל:

$$a = \frac{\Sigma F}{\Sigma m} = \frac{F}{m_1 + m_2}$$

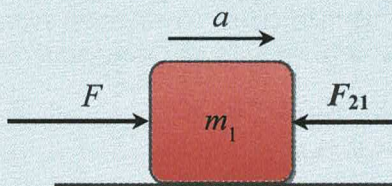
(2) נסמן את הכוח שגוף 1 מפעיל על גוף 2 ב- F_{12} , ואת הכוח שגוף 2 מפעיל על גוף 1 ב- F_{21} . כוחות אלה הם כוחות אינטראקציה (פעולה ותגובה) השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. לכן מספיק לחשב אחד מבין כוחות אלה. על גוף 2 פועל בכיוון התנועה הכוח F_{12} כפי שמתואר בתרשים הבא:



ועל פי החוק השני של ניוטון מתקבל:

$$F_{12} = m_2 a = \frac{m_2 F}{m_1 + m_2}$$

כאשר הצבנו את התאוצה a מסעיף א1. אם רוצים לחשב את F_{21} ולא F_{12} ניעזר בתרשים הבא שבו מתוארים הכוחות הפועלים על m_1 בכיוון התנועה:



על פי החוק השני של ניוטון מתקיים:

$$F - F_{21} = m_1 a$$

$$\Rightarrow F_{21} = F - m_1 a = F - \frac{m_1 F}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 F}{m_1 + m_2}$$

ברור שמתקבלת אותה תוצאה.

ב. כעת נתייחס למצב המתואר בתרשים הבא:

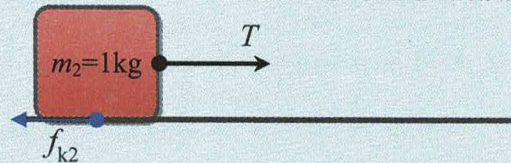
$$f_{k1} = \mu_k N_1 = \mu_k m_1 g = 0.2(20) = 4 \text{ N}$$

$$f_{k2} = \mu_k N_2 = \mu_k m_2 g = 0.2(10) = 2 \text{ N}$$

לחישוב תאוצת המערכת נתייחס אליה כאל גוף אחד שמסתו $m_1 + m_2$ שפועלים עליו בכיוון אופקי הכוחות: F בכיוון התנועה ו- f_{k1} ו- f_{k2} בכיוון מנוגד לכיוון התנועה. מתקיים:

$$a = \frac{\Sigma F}{\Sigma m} = \frac{F - f_{k1} - f_{k2}}{m_1 + m_2} = \frac{36 - 4 - 2}{3} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

לחישוב המתיחות בחוט, נרשום את החוק השני עבור אחד הגופים (הגוף 2 לדוגמה). על גוף זה פועלים בכיוון אופקי הכוחות המתוארים בתרשים הבא:



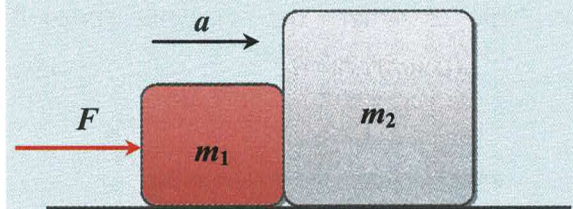
על פי החוק השני של ניוטון מתקיים עבור גוף זה:

$$T - f_{k2} = m_2 a$$

$$\Rightarrow T = m_2 a + f_{k2} = 1(10) + 2 = 12 \text{ N}$$

בעיה 3

בתרשים שלפניך מתוארים שני גופים 1 ו-2 המונחים על משטח אופקי וצמודים זה לזה. מפעילים על הגוף 1 כוח אופקי F וגורמים למערכת שני הגופים לנוע ביחד בתאוצה a .



נתון שמסת הגוף הראשון m_1 ושמסת הגוף השני m_2 ($m_2 > m_1$).

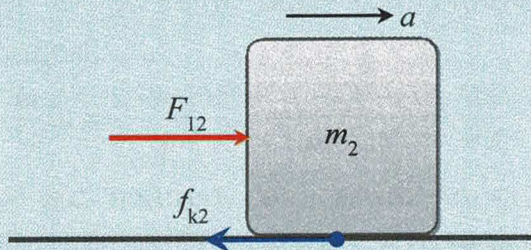
א. נתון שהמשטח חלק. מצא את:

(1) תאוצת המערכת. בטא תשובתך באמצעות נתוני השאלה – כולם או חלקם.

(2) הכוחות שכל אחד משני הגופים מפעיל על האחר. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה, כולם או חלקם.

ב. ענה על סעיף א' אם מחליפים את הגופים

על מנת לחשב את הכוחות הפועלים בין שני הגופים, נרשום את הכוחות הפועלים בכיוון התנועה על אחד הגופים וניעזר בחוק השני של ניוטון. הכוחות הפועלים בכיוון התנועה על הגוף שמקדימה (גוף 2) הם הכוחות המתוארים בתרשים הבא:



מהחוק השני של ניוטון מתקבל:

$$F_{12} - f_{k2} = m_2 a$$

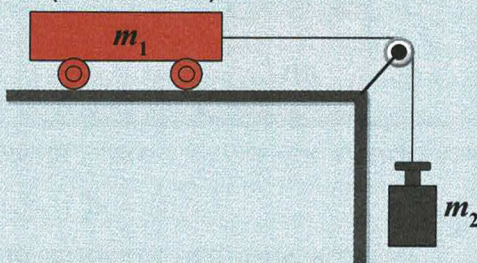
$$\Rightarrow F_{12} - \mu_k m_2 g = m_2 \left(\frac{F}{m_1 + m_2} - \mu_k g \right)$$

$$\Rightarrow F_{12} = \frac{m_2 F}{m_1 + m_2}$$

רואים שכוחות החיכוך בין הגופים למשטח אינם משנים את גודלם של הכוחות שהגופים מפעילים זה על זה.

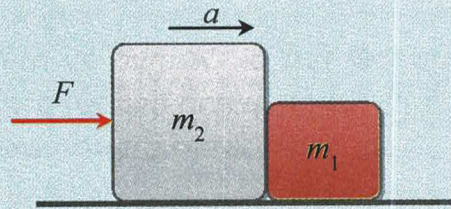
בעיה 4

מניחים עגלה שמסתה m_1 על משטח אופקי. קושרים את העגלה לקצה חוט, את החוט כורכים סביב גלגלת אידיאלית הקבועה בקצה המשטח, ולקצה השני שלו קושרים משקולת שמסתה m_2 . משחררים את m_2 כשהיא נמצאת באוויר (ראה תרשים).



נתון שהחוט חסר מסה וכוחות החיכוך בבעיה זניחים.

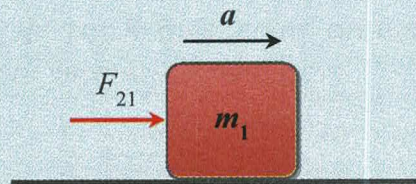
- תאר במלים את תנועת המערכת.
- העזר בנתוני הבעיה ובטא את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט.
- קבע את גודל תאוצת המערכת במקרים הבאים:
 - כאשר $m_2 = 0$.



מכיוון שהכוח השקול בכיוון התנועה לא השתנה וגם מסת המערכת לא השתנתה, נקבל שתאוצת המערכת לא תשתנה:

$$a = \frac{\Sigma F}{\Sigma m} = \frac{F}{m_1 + m_2}$$

לעומת זאת, הכוחות שהגופים מפעילים זה על זה ישתנו. הכוח F_{21} שגוף 2 מפעיל על גוף 1 במצב החדש (ראה את התרשים הבא) נתון על ידי:



$$F_{21} = m_1 a = \frac{m_1 F}{m_1 + m_2}$$

לכן במצב החדש מתקיים:

$$|F_{12}| = |F_{21}| = \frac{m_1 F}{m_1 + m_2}$$

במצב הקודם מתקיים:

$$|F_{12}| = |F_{21}| = \frac{m_2 F}{m_1 + m_2}$$

מכיוון שמתקיים $m_2 > m_1$, הכוחות שפעלו בין שני הגופים כשהגוף בעל המסה הגדולה יותר מונח מקדימה גדולים יותר מהכוחות שפעלו בין שני הגופים כאשר הגוף בעל המסה הקטנה יותר מונח מקדימה.

ג. על הגופים פועלים כוחות חיכוך קינטי הנתונים על ידי הביטויים הבאים:

$$f_{k1} = \mu_k N_1 = \mu_k m_1 g$$

$$f_{k2} = \mu_k N_2 = \mu_k m_2 g$$

על פי החוק השני של ניוטון נקבל:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\Sigma F}{\Sigma m} = \frac{F - f_{k1} - f_{k2}}{m_1 + m_2} = \\ &= \frac{F - \mu_k m_1 g - \mu_k m_2 g}{m_1 + m_2} = \frac{F - \mu_k g (m_1 + m_2)}{m_1 + m_2} \\ \Rightarrow a &= \frac{F}{m_1 + m_2} - \mu_k g \end{aligned}$$

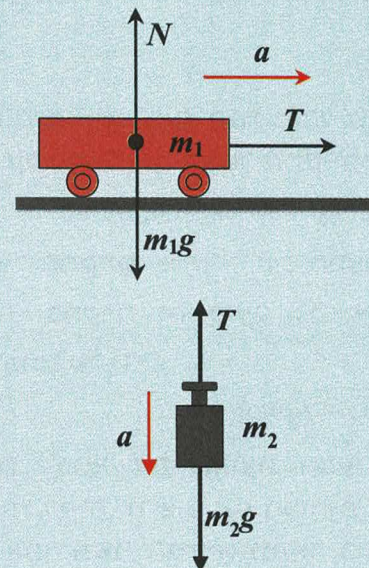
(2) כאשר $m_2 \gg m_1$.

פתרון:

א. על המערכת פועל כוח שקול שהוא כוח הכובד הפועל על המסה m_2 . גודלו של כוח זה הוא $m_2 g$, שהוא גודל קבוע. מכיוון שהכוח השקול הפועל על המערכת קבוע, וגם מסת המערכת קבועה, נקבל על פי החוק השני של ניוטון שהמערכת תנוע בתאוצה קבועה.

ב. על מנת למצוא את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט, נרשום את הכוחות הפועלים על כל אחד משני הגופים וניעזר בחוק השני של ניוטון.

הכוחות הפועלים על שני הגופים מתוארים בשני התרשימים הבאים:



על פי החוק השני של ניוטון מתקיים עבור הגוף הראשון:

$$T = m_1 a$$

ועבור הגוף השני:

$$m_2 g - T = m_2 a$$

קבלנו שתי המשוואות בשני נעלמים a ו- T :

$$\begin{cases} T = m_1 a \\ m_2 g - T = m_2 a \end{cases}$$

נחבר את שתי המשוואות ונקבל:

$$T + m_2 g - T = a(m_1 + m_2)$$

$$\Rightarrow a = \frac{m_2 g}{m_1 + m_2}$$

על מנת לחשב את המתיחות בחוט נציב את התאוצה באחת משתי המשוואות למעלה.

נציב במשוואה הראשונה ונקבל:

$$T = m_1 a = \frac{m_1 m_2 g}{m_1 + m_2}$$

הערה: בבעיה זו ניתן למצוא גם את התאוצה על ידי כך שנתייחס למערכת כאל גוף אחד שמסתו $m_1 + m_2$ שפועל עליו כוח חיצוני שקול שהוא כוח הכובד שפועל על m_2 , כלומר $m_2 g$. לכן, על פי החוק השני של ניוטון, נקבל:

$$a = \frac{\Sigma F}{\Sigma m} = \frac{m_2 g}{m_1 + m_2}$$

ג.

(1) כאשר המסה m_2 מתאפסת תאוצת המערכת מתאפסת.

(2) כאשר מתקיים $m_2 \gg m_1$, ניתן להזניח את מסת העגלה. במקרה זה ניתן להניח שהמשקולת נופלת חופשית, ולכן תאוצתה (תאוצת המערכת) היא תאוצת הנפילה החופשית, g .

ניתן להראות זאת גם בדרך מתמטית על ידי מציאת הגבול של הגודל:

$$a = \frac{m_2 g}{m_1 + m_2}$$

כאשר $m_2 \gg m_1$. על מנת לחשב את הגבול של התאוצה במקרה זה נחלק את המונה והמכנה במשוואה האחרונה ב- m_2 ונקבל:

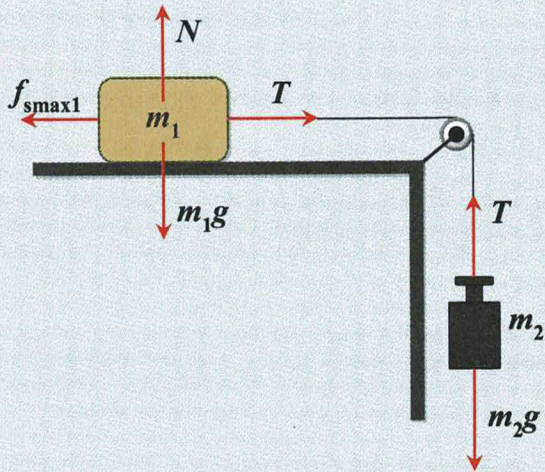
$$(27) \quad a = \frac{g}{\left(\frac{m_1}{m_2}\right) + 1}$$

מכיוון שעבור $m_2 \gg m_1$ הגודל m_1 / m_2 שואף לאפס, נקבל שעבור $m_2 \gg m_1$ התאוצה a שואפת ל- g (תאוצת הכובד).

את החישוב הקודם ניתן לבטא בכתיב מתמטי באופן הבא:

$$\lim_{m_2 \rightarrow \infty} \left(\frac{m_2 g}{m_1 + m_2} \right) = \lim_{m_2 \rightarrow \infty} \frac{g}{\left(\frac{m_1}{m_2}\right) + 1} = g$$

אם נשרטט את תאוצת המערכת כפונקציה של הגודל m_2 / m_1 , כלומר את הקשר (27), נקבל את הגרף הבא:



מכיוון שהמערכת נמצאת במנוחה נקבל על סמך החוק הראשון של ניוטון עבור m_1 :

$$T = f_{s\max 1} = \mu_s m_1 g$$

ועבור m_2 :

$$T = m_2 g$$

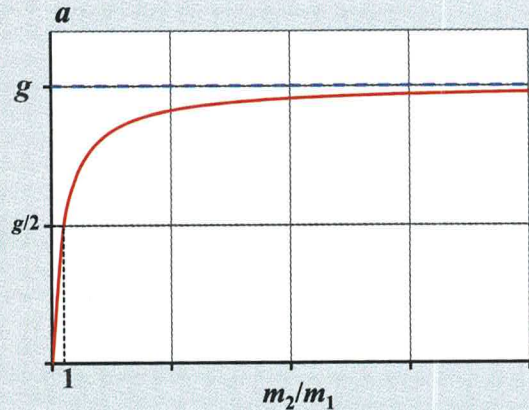
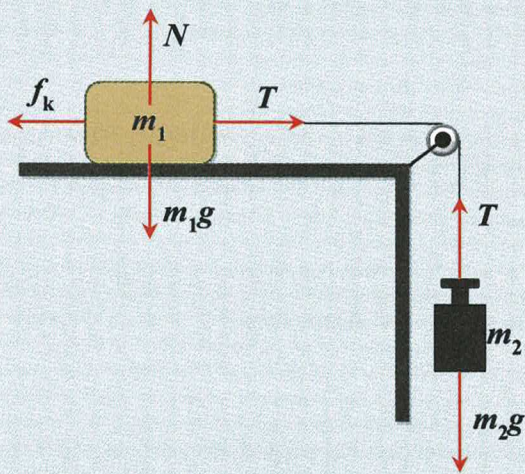
משתי המשוואות האחרונות נקבל שהמערכת נמצאת על סף תנועה כאשר מתקיים:

$$m_2 g = \mu_s m_1 g \Rightarrow m_2 = \mu_s m_1$$

ב. כאשר מתקיים $m_2 > \mu_s m_1$, המערכת נעה בתאוצה. במקרה זה פועל על m_1 חיכוך קינטי הנתון על ידי:

$$f_k = \mu_k N_1 = \mu_k m_1 g$$

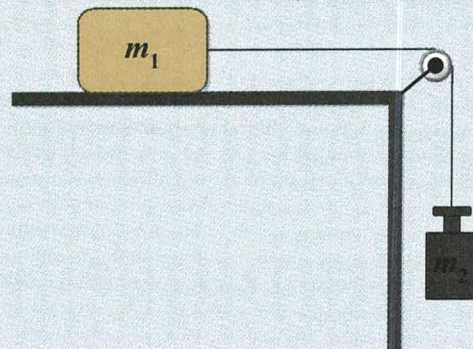
על מנת לבטא את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט, נרשום את הכוחות הפועלים על כל אחד משני הגופים וניעזר בחוק השני של ניוטון. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על כל אחד משני הגופים במקרה זה:



התאוצה מתקרבת אסימפטוטית לגודל g עבור $m_2 / m_1 \rightarrow \infty$.

בעיה 5

מחליפים את העגלה בבעיה הקודמת בגוף שמסתו m_1 המונח על המשטח (ראה תרשים). נתון שבין m_1 למשטח קיים חיכוך. מקדמי החיכוך הקינטי והסטטי בין הגוף למשטח הם μ_k ו- μ_s , בהתאמה.



א. מצא את גודלה של המסה m_2 שעבורה המערכת נמצאת על סף תנועה. בטא את תשובתך באמצעות נתוני הבעיה, כולם או חלקם.

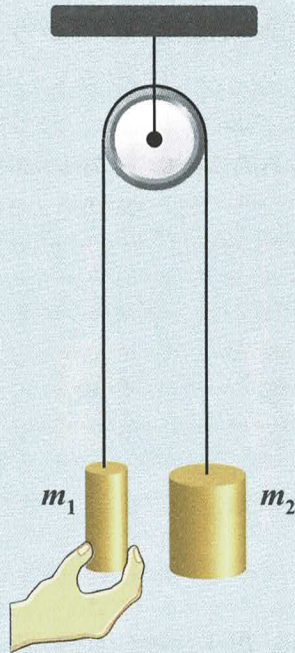
ב. מצא את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט עבור m_2 הגדול מהערך שחישבת בסעיף הקודם. בטא את תשובתך באמצעות נתוני הבעיה, כולם או חלקם.

פתרון:

א. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על שני הגופים m_1 ו- m_2 במצב שבו המערכת נמצאת על סף תנועה, כלומר המצב שבו החיכוך הסטטי הפועל על m_1 מגיע לערכו המקסימלי שהוא:

$$f_{s\max 1} = \mu_s N_1 = \mu_s m_1 g$$

ב. מצא את גודלו של הכוח שהתלמיד הפעיל על m_1 . בטא את תשובתך בעזרת נתוני הבעיה, כולם או חלקם.



התלמיד משחרר את המסה m_1 .

ג. מצא את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט המחובר בין שתי המסות. בטא את תשובתך בעזרת נתוני הבעיה, כולם או חלקם.

ד. מצא את המתיחות בחוט המחובר בין הגלגלת לתקרה. בטא את תשובתך בעזרת נתוני הבעיה, כולם או חלקם.

פתרון:

א. על מנת לחשב את המתיחות בחוט, T , נרשום את הכוחות הפועלים על המסה m_2 וניעזר בחוק הראשון של ניוטון. הכוחות הפועלים על m_2 הם כוח הכובד m_2g כלפי מטה והמתיחות בחוט T כלפי מעלה. על סמך החוק הראשון של ניוטון נקבל:

$$T = m_2g$$

ב. נרשום את הכוחות הפועלים על המסה m_1 וניעזר בחוק הראשון של ניוטון. הכוחות הפועלים על m_1 הם; כוח הכובד m_1g כלפי מטה, הכוח F שהתלמיד מפעיל כלפי מטה והמתיחות בחוט T שכיוונה כלפי מעלה. על סמך החוק הראשון של ניוטון מתקיים:

$$F + m_1g = T$$

על פי החוק השני של ניוטון נקבל עבור m_1 :

$$T - f_k = m_1a$$

ועבור m_2 נקבל:

$$m_2g - T = m_2a$$

קיבלנו אפוא שתי המשוואות בשני נעלמים:

$$\begin{cases} T - f_k = m_1a \\ m_2g - T = m_2a \end{cases}$$

נחבר את שתי המשוואות ונקבל:

$$m_2g - f_k = (m_1 + m_2)a$$

$$\Rightarrow a = \frac{m_2g - f_k}{m_1 + m_2}$$

נציב $f_k = \mu_k N_1 = \mu_k m_1g$ ונקבל:

$$a = \frac{(m_2 - \mu_k m_1)g}{m_1 + m_2}$$

על מנת למצוא את המתיחות בחוט נציב את התאוצה באחת המשוואות שלמעלה. נבחר במשוואה השנייה ונקבל:

$$m_2g - T = m_2 \left[\frac{(m_2 - \mu_k m_1)g}{m_1 + m_2} \right]$$

$$\Rightarrow T = m_2g - \frac{m_2^2g - \mu_k m_1 m_2g}{m_1 + m_2}$$

$$\Rightarrow T = \frac{m_1 m_2g + m_2^2g - m_2^2g + \mu_k m_1 m_2g}{m_1 + m_2}$$

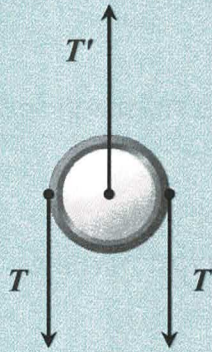
$$\Rightarrow T = \frac{m_1 m_2g(1 + \mu_k)}{m_1 + m_2}$$

בעיה 6

תלמיד קושר גלגלת אידיאלית (חסרת מסה) באמצעות חוט לתקרה. סביב הגלגלת הוא כורך חוט שמסתו זניחה. לקצה אחד של החוט קושר התלמיד את המשקולת m_1 ולקצהו השני הוא קושר את המשקולת m_2 . נתון $m_2 > m_1$. על מנת לשמור על המערכת במצב מנוחה, התלמיד מחזיק את המסה m_1 (מפעיל עליה כוח כלפי מטה) כפי שמתואר בתרשים שלפניך. נתון ששני חלקי החוט מקבילים וניצבים לפני הקרקע.

א. מצא את המתיחות בחוט המחובר בין שתי המסות. בטא את תשובתך בעזרת נתוני הבעיה, כולם או חלקם.

הראשון של ניוטון. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגלגלת (שים לב שמסת הגלגלת זניחה כי נתון שהיא אידיאלית):



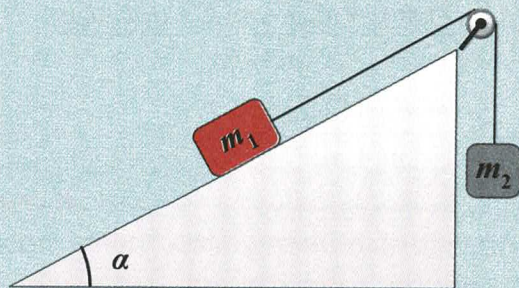
על פי החוק הראשון של ניוטון נקבל:

$$T' = 2T = \frac{4m_1m_2g}{m_1 + m_2}$$

בעיה 7

בתרשים שלפניך מתואר גוף שמסתו $m_1 = 2 \text{ kg}$ המונח על מישור משופע וחלק שזווית השיפוע שלו $\alpha = 30^\circ$. הגוף קשור לקצה חוט שמסתו זניחה. החוט כרוך סביב גלגלת אידיאלית, ולקצהו האחר קשור גוף שמסתו m_2 התלוי באוויר.

נתון שחלק החוט הנמצא מעל המישור המשופע מקביל למישור זה.



משחררים את המערכת ממנוחה.

א. חשב את גודלה של m_2 על מנת שהמערכת תישאר במנוחה.

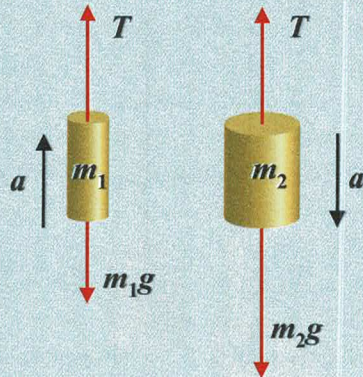
ב. חשב את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט אם נתון ש- $m_2 = 2 \text{ kg}$.

ג. במקרה אחר נתון שקיים חיכוך בין m_1 למשטח. מקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף למשטח שווים, 0.4 כל אחד מהם. בדוק האם במקרה זה (כאשר $m_2 = 2 \text{ kg}$) המערכת נמצאת במנוחה או בתנועה. אם המערכת נמצאת במנוחה

נציב את T מסעיף א' ונקבל:

$$F + m_1g = m_2g \\ \Rightarrow F = (m_2 - m_1)g$$

ג. על מנת לחשב את תאוצת המערכת, נרשום את הכוחות הפועלים על כל אחד משני הגופים וניעזר בחוק השני של ניוטון. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על כל אחד משני הגופים:



על פי החוק השני של ניוטון מתקיים עבור m_1 :

$$T - m_1g = m_1a$$

ועבור m_2 מתקיים:

$$m_2g - T = m_2a$$

קבלנו את שתי המשוואות הבאות:

$$\begin{cases} T - m_1g = m_1a \\ m_2g - T = m_2a \end{cases}$$

שהן שתי משוואות בשני הנעלמים a ו- T . על מנת למצוא את הנעלמים, נחבר את שתי המשוואות ונקבל:

$$m_2g - m_1g = (m_1 + m_2)a$$

$$\Rightarrow a = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}g$$

על מנת למצוא את המתיחות בחוט המחבר בין שתי המשקולות, נציב את התאוצה באחת המשוואות שלמעלה. נבחר במשוואה הראשונה ונקבל:

$$T - m_1g = m_1 \left(\frac{m_2g - m_1g}{m_1 + m_2} \right)$$

$$\Rightarrow T = \frac{2m_1m_2g}{m_1 + m_2}$$

ד. על מנת לחשב את המתיחות T' בחוט המחבר בין הגלגלת לתקרה, נרשום את הכוחות הפועלים על הגלגלת וניעזר בחוק

$$T - m_1 g \sin \alpha = m_1 a$$

ועבור m_2 :

$$m_2 g - T = m_2 a$$

קיבלנו שתי משוואות בשני נעלמים:

$$\begin{cases} T - m_1 g \sin \alpha = m_1 a \\ m_2 g - T = m_2 a \end{cases}$$

נחבר את שתי המשוואות ונקבל:

$$m_2 g - m_1 g \sin \alpha = (m_1 + m_2) a$$

$$\Rightarrow a = \left(\frac{m_2 - m_1 \sin \alpha}{m_2 + m_1} \right) g$$

$$\Rightarrow a = \left(\frac{2 - 2 \sin 30}{2 + 2} \right) 10 = 2.5 \text{ m/s}^2$$

על מנת לחשב את המתיחות בחוט נציב את התאוצה באחת המשוואות. נבחר במשוואה הראשונה ונקבל:

$$T - m_1 g \sin \alpha = m_1 a$$

$$\Rightarrow T - 20 \sin 30 = 2(2.5)$$

$$\Rightarrow T = 15 \text{ N}$$

ג. מאחר ומתקיים $m_2 g > m_1 g \sin \alpha$ המערכת נוטה לנוע בכיוון מחוגי השעון, כך שהמסה m_2 תרד כלפי מטה.

התנאי שצריך להתקיים על מנת שהמערכת תצליח לנוע במקרה זה הוא:

$$m_2 g - m_1 g \sin \alpha > f_{s \max}$$

מתקיים:

$$\begin{aligned} f_{s \max} &= \mu_s N_1 = \mu_s m_1 g \cos 30 = \\ &= 0.4(20) \cos 30 = 6.93 \text{ N} \end{aligned}$$

לעומת זאת:

$$m_2 g - m_1 g \sin \alpha = 20 - 20 \sin 30 = 10 \text{ N}$$

מכיוון שמתקיים $m_2 g - m_1 g \sin \alpha > f_{s \max}$ המערכת תנוע בתאוצה בכיוון מחוגי השעון. בתרשים שלפניך מתוארים הכוחות הפועלים על שתי המסות במקרה זה כאשר:

$$\begin{aligned} f_k &= \mu_k N_1 = \mu_k m_1 g \cos 30 = \\ &= 0.4(20) \cos 30 = 6.93 \text{ N} \end{aligned}$$

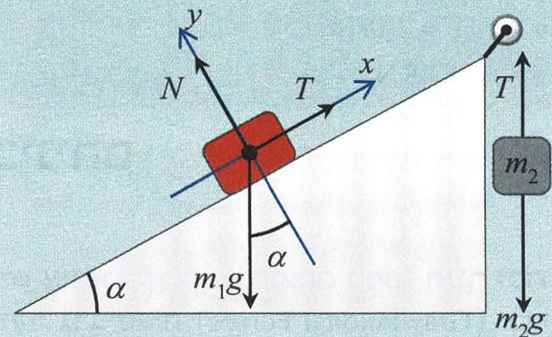
על פי החוק השני של ניוטון נקבל את שתי המשוואות הבאות עבור שתי המסות:

$$\begin{cases} m_2 g - T = m_2 a \\ T - m_1 g \sin 30 - f_k = m_1 a \end{cases}$$

מצא את גודלו ואת כיוונו של החיכוך הסטטי הפועל על m_1 , ואם המערכת נמצאת בתנועה חשב את גודל וכיוון התאוצה.

פתרון:

א. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגופים m_1 ו- m_2 .



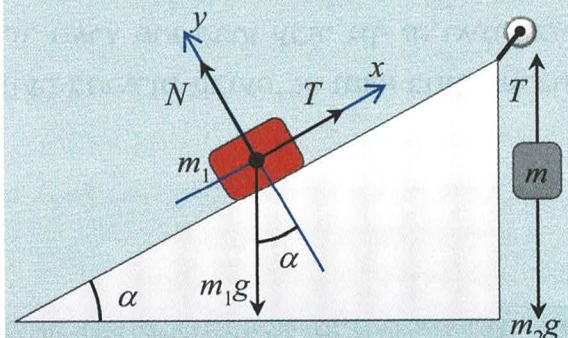
אם המערכת נמצאת במנוחה מתקיים עבור m_1 : $T = m_1 g \sin \alpha$ ועבור m_2 : $T = m_2 g$. משתי משוואות אלה נקבל שהתנאי שהמערכת תישאר במנוחה הוא:

$$m_2 g = m_1 g \sin \alpha$$

$$\Rightarrow m_2 = m_1 \sin \alpha = 2 \sin 30 = 1 \text{ kg}$$

ב. אם $m_2 = 2 \text{ kg}$, נקבל על פי התוצאה שהתקבלה בסעיף הקודם שהמערכת תנוע בתאוצה כך שהמסה m_2 יורדת כלפי מטה. על מנת לחשב את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט, נרשום את הכוחות הפועלים על כל אחת משתי המסות וניעזר בחוק השני של ניוטון.

הכוחות הפועלים על שתי המסות מתוארים בתרשים שלפניך.

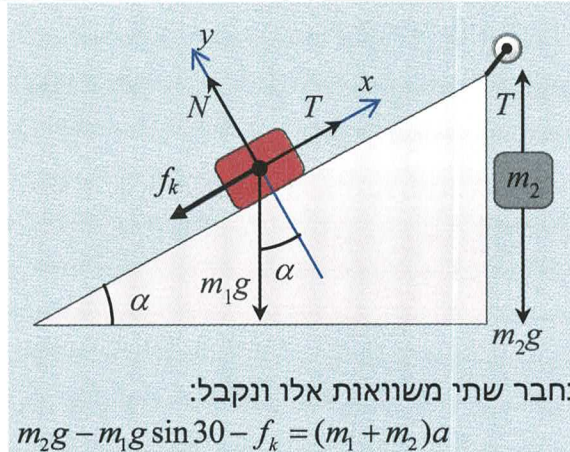


על פי החוק השני של ניוטון מתקיים עבור m_1 :

$$\Rightarrow a = \frac{m_2 g - m_1 g \sin 30 - f_k}{m_1 + m_2} = \frac{20 - 10 - 6.93}{2 + 2} = 0.76 \text{ m/s}^2$$

לחישוב המתיחות בחוט, נציב את התאוצה ואת שאר הערכים באחת המשוואות שלמעלה. נבחר במשוואה הראשונה ונקבל:

$$\begin{aligned} m_2 g - T &= m_2 a \\ \Rightarrow 20 - T &= 2(0.76) \\ \Rightarrow T &= 18.48 \text{ N} \end{aligned}$$



6. כוח הכובד, המשקל והקשר ביניהם

6.1 כוח הכובד

כפי שהוסבר בפרק 5, בין הגופים ובין כדור הארץ יש אינטראקציה שכתוצאה ממנה הגוף וכדור הארץ מפעילים זה על זה כוחות משיכה הנקראים כוחות גרביטציה (Gravitational Forces). כדור הארץ מפעיל על הגוף כוח המסומן ב- F_G , והגוף מפעיל על כדור הארץ כוח המסומן ב- F'_G . כוחות אלה הם כוחות אינטראקציה (פעולה ותגובה) השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. למרות ששני כוחות אלה שווים בגודלם, השפעת הכוח שהגוף מפעיל על כדור הארץ לא נראית לעין בגלל המסה הענקית של כדור הארץ ביחס לגוף. לעומת זאת, השפעת הכוח שכדור הארץ מפעיל על הגוף מורגשת היטב ומופיעה בצורת תנועה מואצת של הגוף לכיוון מרכז כדור הארץ, ובמילים פשוטות – נפילה אל הקרקע (מסת כדור הארץ היא $6 \times 10^{24} \text{ kg}$ בערך).

כוח הגרביטציה שכדור הארץ מפעיל על הגופים הנמצאים בסביבתו, נקרא גם כוח הכובד. כוח זה, כאמור, מסומן ב- F_G .

מתקיים:

1. כוח הכובד שכדור הארץ מפעיל על גוף מסוים תלוי במסת הגוף m , במסת כדור הארץ M_E , ובמרחק הגוף ממרכז כדור הארץ, r .

2. מסת כדור הארץ היא גודל קבוע, ועל פני כדור הארץ r קבוע ושווה לרדיוס כדור הארץ שהוא בקירוב $R_E = 6,380 \text{ km}$. במקרה זה כוח הכובד תלוי במסת הגוף בלבד, והוא נתון, כפי שמצאנו, על פי החוק השני של ניוטון, על ידי הביטוי:

$$(28) \quad F_G = mg$$

כאשר g היא תאוצת הכובד על פני כדור הארץ, שהיא 9.8 m/s^2 בקירוב.

3. כוח הכובד, F_G , הפועל על גוף נתון על פני כדור הארץ הוא קבוע עבור גוף זה ואינו תלוי במצב שבו נמצא הגוף, בין אם הוא במנוחה, בתנועה במהירות קבועה, או נמצא בתוך מערכת הנעה בתאוצה.

6.2 המשקל

משקלו של גוף מוגדר באופן הבא:

הוא התוצאה המתקבלת משקילת הגוף, כלומר הקריאה המתקבלת כאשר מניחים את הגוף על מאזני כוח או מד כוח. גודל זה מסומן באות W מהלועזית Weight.

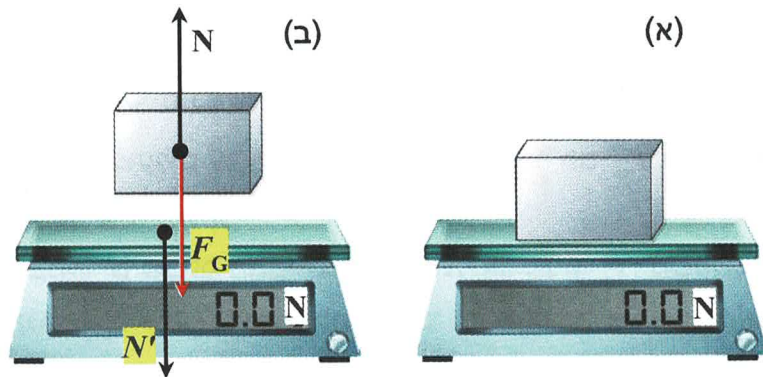
נענה על השאלות הבאות:

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

1. מהו הגודל הפיזיקלי אותו מייצג המשקל?
2. האם משקלו של גוף, W , שווה לכוח הכובד, F_G , הפועל על הגוף?

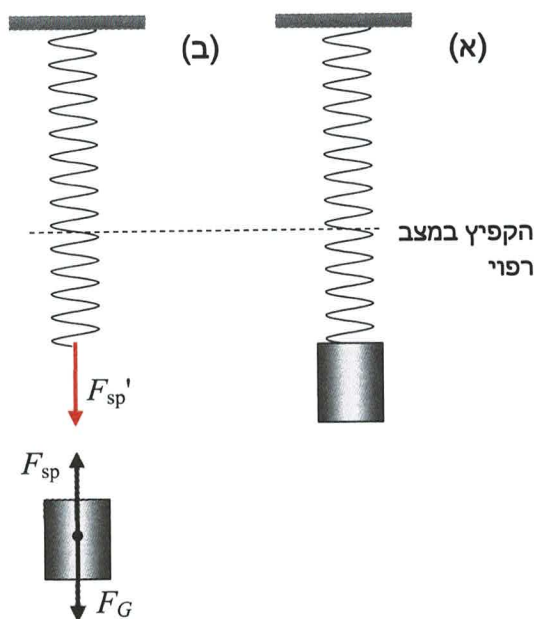
תשובה לשאלה 1: מהו הגודל הפיזיקלי אותו מייצג המשקל?

כאשר רוצים למדוד את משקלו של גוף אנו מניחים אותו על מאזני כוח או תולים אותו על דינמומטר (קפיץ מכויל). בשני המקרים מד הכוח מודד את הכוח שהגוף מפעיל עליו. באיור 8 א מוצג גוף המונח על מאזני כוח. המאזניים מודדים את הכוח שהגוף מפעיל עליהם (על משטח המאזניים) ולא את הכוחות הפועלים על הגוף עצמו. הכוחות הפועלים על הגוף עצמו הם כוח הכובד F_G כלפי מטה, והכוח הנורמלי N שמשטח המאזניים מפעיל עליו כלפי מעלה כפי שמתואר באיור 8ב.



איור 8: (א) גוף מונח על מאזני כוח. (ב) הכוחות הפועלים על הגוף והכוח שהגוף מפעיל על משטח המאזניים

הכוח שהגוף מפעיל על המאזניים הוא כוח התגובה לכוח N , ומסומן ב- N' (ראה איור 8ב). לכן המאזנים מודדים את הכוח N' . מאחר והכוח N' , על פי החוק השלישי של ניוטון, שווה בגודלו לכוח הנורמלי N , נקבל שמאזני הכוח מודדים גודל השווה בגודלו לכוח הנורמלי N .



איור 9: (א) גוף קשור לדינמומטר. (ב) הכוחות הפועלים על הגוף והכוח שהגוף מפעיל על הדינמומטר.

באיור 9 א מוצג גוף התלוי על דינמומטר (קפיץ). הקפיץ מתארך כתוצאה מהכוח שהגוף מפעיל עליו, לכן מדידת הדינמומטר שווה לכוח שהגוף מפעיל עליו, ולא לכוחות הפועלים על הגוף עצמו. הכוחות הפועלים על הגוף עצמו במקרה זה הם כוח הכובד F_G כלפי מטה, וכוח הקפיץ F_{sp} שהקפיץ מפעיל עליו כלפי מעלה כפי שמתואר באיור 9ב. הכוח שהגוף מפעיל על קצה הקפיץ הוא כוח התגובה לכוח F_{sp} שמסומן ב- F_{sp}' (ראה איור 9ב). זהו כוח השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח F_{sp} . לכן הדינמומטר מודד כוח השווה בגודלו לכוח שהקפיץ מפעיל על הגוף.

מסקנה: משקלו של גוף מייצג את הכוח שהגוף מפעיל על מד הכוח. זהו כוח השווה בגודלו לכוח הנורמלי N שהמאזניים מפעילים על הגוף במקרה המתואר באיור 8, או לכוח F_{sp} שהקפיץ מפעיל על הגוף במקרה המתואר באיור 9. כלומר $W = N$ או $W = F_{sp}$.

תשובה לשאלה 2: האם משקלו של גוף שווה לכוח הכובד הפועל על הגוף?

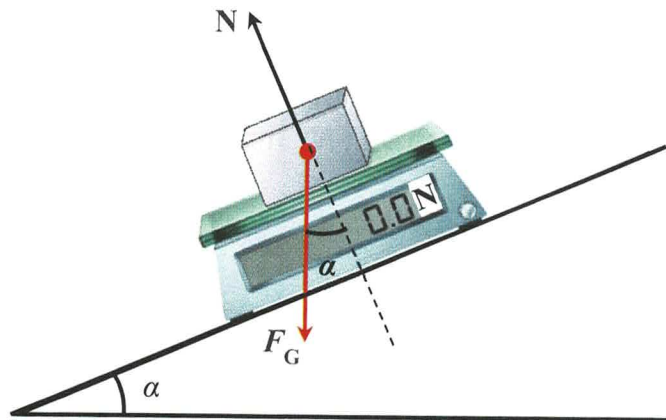
מכיוון שמשקלו של גוף שווה לגודלו של הכוח הנורמלי N באיור 8, או לכוח הקפיץ F_{sp} באיור 9, נקבל שמשקלו של הגוף שווה לכוח הכובד כאשר מתקיים $N = F_G$ עבור מאזני הכוח, או $F_{sp} = F_G$ עבור הדינמומטר.

התנאי הראשון ($N = F_G$) מתקיים כאשר מתקיימים התנאים הבאים:

1. המאזניים מונחים על משטח אופקי.
2. הכוחות היחידים הפועלים על הגוף הם N ו- F_G .
3. הגוף נמצא בשיווי משקל.

התנאי השני ($F_{sp} = F_G$) מתקיים כאשר מתקיימים התנאים הבאים:

1. הכוחות היחידים הפועלים על הגוף הקשור לדינמומטר הם F_{sp} ו- F_G .
 2. הגוף נמצא במצב שווי משקל.
- על פי האמור לעיל, במקרים שבהם מתקיים ש- $N \neq F_G$ או $F_{sp} \neq F_G$, משקלו של הגוף שונה מכוח הכובד שפועל על הגוף ($W \neq F_G$). דוגמה למקרה בו $W \neq F_G$, היא כאשר מאזני הכוח מונחים על מישור משופע, כפי שמתואר באיור 10.



איור 10: גוף מונח על מאזני כוח מונח על מישור משופע.

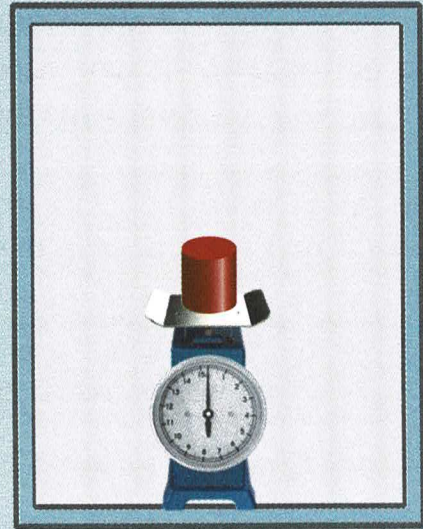
במקרה זה $N = F_G \cos \alpha$ כאשר α היא זווית השיפוע של המישור המשופע. מכאן שמשקלו של הגוף הוא: $W = F_G \cos \alpha = mg \cos \alpha \neq F_G$. מקרה נוסף שבו $W \neq F_G$ הוא כאשר הגוף לא נמצא במצב שווי משקל, לדוגמה אם המאזניים או הדינמומטר נמצאים בתוך מעלית הנמצאת בתאוצה. במקרה זה $N \neq F_G$ או $F_{sp} \neq F_G$ ולכן $W \neq F_G$. נדון במקרה זה בהרחבה בתת סעיף הבא (6.3).

6.3 המשקל בתוך מעלית הנעה בתאוצה

אם מאזני הכוח עליהם מונח הגוף נמצאים בתוך מעלית הנעה בתאוצה, הגוף לא נמצא בשווי משקל. במקרה זה מתקיים ש- $N \neq F_G$ ולכן משקלו של הגוף W אינו שווה לכוח הכובד הפועל על הגוף. נדון במקרה זה באמצעות הדוגמאות הבאות.

דוגמה 1

בתרשים שלפניך מתואר גוף שמסתו m המונח על מאזני כוח. המאזניים מונחים בתוך מעלית.

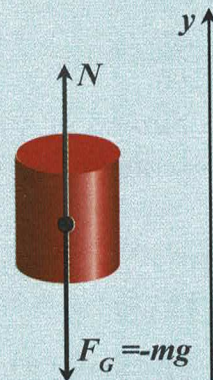


מצא את קריאת המאזניים (משקלו W של הגוף) במקרים הבאים:

- כאשר המעלית נמצאת במנוחה.
- כאשר המעלית נמצאת בתנועה במהירות קבועה.
- כאשר המעלית נעה בתאוצה a .
- כאשר המעלית נופלת נפילה חופשית.

פתרון:

א. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף כאשר בחרנו את הכיוון החיובי כלפי מעלה:



הכוחות הם כוח הכובד $F_G = -mg$ (כוח זה שלילי כי הוא מכיוון לכיוון השלילי של הציר שבחרנו) והכוח הנורמלי N שכיוונו כלפי מעלה. בגלל שהמעלית נמצאת במנוחה נקבל על פי החוק הראשון של ניוטון:

$$\Sigma F_y = N + F_G = 0$$

$$\Rightarrow N + (-mg) = 0$$

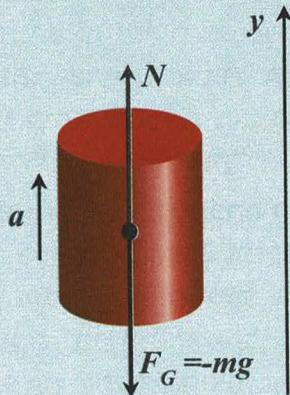
$$\Rightarrow N = mg$$

מכיוון שמשקל הגוף שווה לכוח N , נקבל:

$$W = mg$$

ב. כאשר המעלית נעה במהירות קבועה, הגוף שוב נמצא במצב שווי משקל ולכן נקבל גם במקרה זה $W = mg$.

ג. מכיוון שהמעלית נעה בתאוצה כלפי מעלה, גם הגוף נע בתאוצה כפי שמתואר בתרשים הבא:



במקרה זה נקבל על פי החוק השני של ניוטון:

$$\Sigma F_y = ma$$

$$\Rightarrow N + F_G = ma$$

$$\Rightarrow N + (-mg) = ma$$

$$\Rightarrow N = m(g + a)$$

מכיוון שמשקלו של הגוף שווה לכוח הנורמלי נקבל במקרה זה ש:

$$W = m(g + a)$$

ננתח את המשוואה האחרונה במקרים אחדים:

1. אם הגוף הנמצא בתוך המעלית מצוי בשווי משקל (תאוצת המעלית שווה לאפס), משקלו של הגוף שווה לכוח הכובד הפועל עליו ($W = mg$).

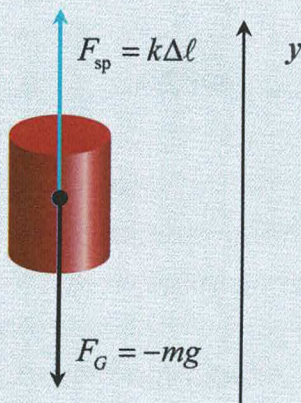
2. אם המעלית נעה בתאוצה חיובית ($a > 0$), כלומר המעלית נעה כלפי מעלה בתאוצה או כלפי מטה בתאוצה, נקבל ש-
 $W > mg$.

3. אם המעלית נעה בתאוצה שלילית ($a < 0$), כלומר המעלית נעה כלפי מעלה

חשב את התארכות הקפיץ במקרים הבאים:
 א. כאשר המעלית נמצאת במנוחה או בתנועה מעלה או מטה במהירות קבועה.
 ב. כאשר המעלית נעה כלפי מעלה בתאוצה 4 m/s^2 .
 ג. כאשר המעלית נעה כלפי מטה בתאוצה 4 m/s^2 .

פתרון:

א. בתרשים הבא מתואר הגוף והכוחות הפועלים עליו, שהם כוח הכובד $F_G = -mg$ וכוח הקפיץ $F_{sp} = k\Delta\ell$, כאשר $\Delta\ell$ הוא גודל התארכות הקפיץ, וכאשר בחרנו את הכיוון החיובי של ציר y כלפי מעלה.



מכיוון שהגוף נמצא בשיווי משקל, נקבל על פי החוק הראשון של ניוטון:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Rightarrow F_{sp} + F_G = 0$$

$$\Rightarrow k\Delta\ell + (-mg) = 0$$

$$\Rightarrow \Delta\ell = \frac{mg}{k} = \frac{20}{200} = 0.1 \text{ m}$$

ב. מכיוון שהגוף נע בתאוצה a , נקבל על פי החוק השני של ניוטון שמתקיים:

$$\Sigma F_y = ma$$

$$\Rightarrow F_{sp} + F_G = ma$$

$$\Rightarrow k\Delta\ell + (-mg) = ma$$

$$\Rightarrow \Delta\ell = \frac{m(g+a)}{k} = \frac{2(10+4)}{200} = 0.14 \text{ m}$$

ג. במצב המתואר בסעיף זה מתקיים: $a = -4 \text{ m/s}^2$. לכן נקבל על פי הביטוי שקבלנו בסעיף הקודם:

$$\Delta\ell = \frac{m(g+a)}{k} = \frac{2(10-4)}{200} = 0.06 \text{ m}$$

בתאוצה או כלפי מטה בתאוצה, נקבל ש-

$$W < mg$$

ד. אם המעלית נופלת נפילה חופשית אז מתקיים $a = -g$. במקרה זה נקבל על פי הביטוי שקיבלנו בסעיף הקודם:

$$W = m(g+a) = m(g-g) = 0$$

כלומר משקלו של הגוף במקרה זה מתאפס. זהו מצב של חוסר משקל. המסקנה היא שגופים הנמצאים בתוך מערכת הנופלת נפילה חופשית הם חסרי משקל.

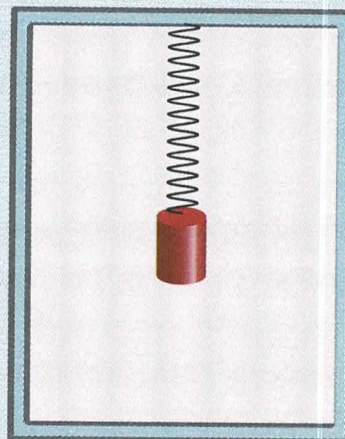
מה שקורה במצב זה הוא שמכיוון שהן הגוף והן המעלית נופלים נפילה חופשית, יש להם אותה תאוצה, שהיא תאוצת הכובד. לכן תאוצת הגוף ביחס למעלית מתאפסת, והגוף בתוך המעלית יהיה חסר משקל.

עובדה זו מנוצלת למקרים שבהם רוצים לקבל מצבי חוסר משקל, לדוגמה במקרים שבהם רוצים לאמן את האסטרונאוטים על פני כדור הארץ לתפקד בחוסר משקל, עוד לפני ששולחים אותם לחלל החיצון. מכיוון שלא ניתן לבטל את כוח הכובד, יוצרים תנאי חוסר משקל על ידי שימוש במערכת הנופלת נפילה חופשית.

האסטרונאוטים עולים למטוס מיוחד שטס לגבהים גדולים, ומשם המטוס מנמיך באופן המדמה נפילה חופשית. במקרה זה האסטרונאוטים מרחפים מספר דקות בתוך המטוס במצב של חוסר משקל.

דוגמה 2

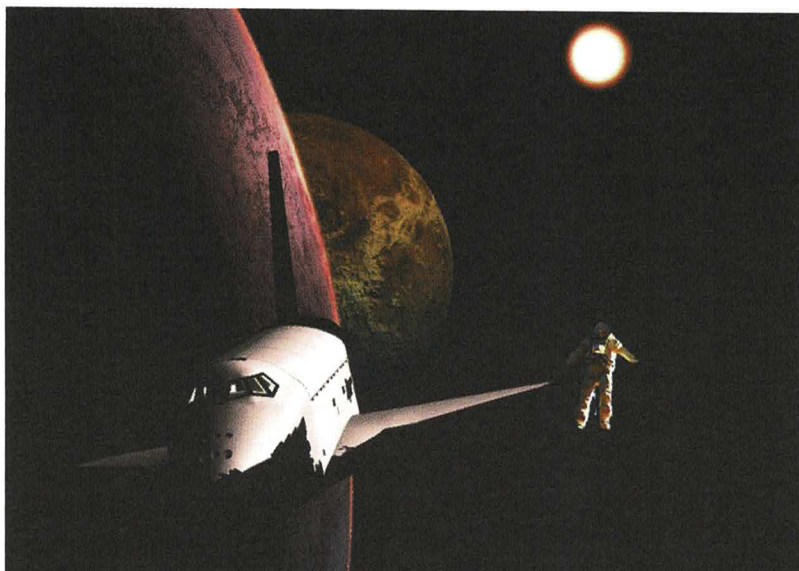
קושרים גוף שמסתו $m = 2 \text{ kg}$ לתקרת מעלית באמצעות קפיץ, שהקבוע שלו 200 N/m , כפי שמתואר בתרשים הבא:



7. תנועה על פני כדור הארץ

7.1 תנועה וכוחות אינטראקציה

שינוי מצב התמדה (מנוחה או תנועה במהירות קבועה) של גוף מחייב הפעלת כוח על גוף זה. מכיוון שכוח נוצר מאינטראקציה בין שני גופים, נקבל ששינוי מצב התמדה של הגוף מחייב קיום אינטראקציה בין גוף זה לגוף אחר. על מנת להבהיר רעיון זה נדון בדוגמה הבאה: אסטרונאוט יצא מחללית, ונמצא במנוחה (ביחס לחללית) במרחק מסוים ממנה, כפי שמתואר באיור 11. על מנת שהאסטרונאוט יוכל לחזור לחללית הוא צריך לנוע, ודבר זה מחייב הפעלת כוח עליו.



איור 11: אסטרונאוט נמצא במנוחה במרחק מסוים מהחללית. על מנת שהוא ינוע לכיוון החללית צריך לפעול עליו כוח בכיוון החללית.

הפעלת כוח על האסטרונאוט דורשת, על פי החוק השלישי של ניוטון, אינטראקציה בינו ובין גוף אחר. מכיוון שבמצב זה אין אינטראקציה בין האסטרונאוט לבין אף גוף אחר, לא יפעל עליו כוח לכיוון החללית והוא לעולם לא יצליח לחזור לחללית אפילו אם היד שלו נמצאת במרחק סנטימטרים בודדים מהחללית. אם נניח שהאסטרונאוט יאחז בחליפת החלל שלו ויפעיל על עצמו כוח לכיוון החללית, אז על פי החוק השלישי של ניוטון יפעל על ידו כוח זהה בכיוון ההפוך. מכיוון שהיד שלו והגוף שלו הם גוף אחד, סך כל הכוחות עליו במקרה זה מתאפס והוא נשאר במנוחה.

אבל אם האסטרונאוט קשור באמצעות חבל לחללית, יכולה להיווצר אינטראקציה בינו לבין החללית. הוא יכול להפעיל כוח על החללית באמצעות החבל, ובו בזמן, על פי החוק השלישי של ניוטון, החללית מפעילה עליו כוח השווה בגודל ומנוגד בכיוון וזאת באמצעות החבל. כתוצאה מכוחות אינטראקציה אלה, גם החללית וגם האסטרונאוט מתחילים להתקרב זה לזה. מכיוון שמסת האסטרונאוט קטנה מאוד ביחס למסת החללית, האסטרונאוט ינוע, על פי החוק השני של ניוטון, כלפי החללית בתאוצה גדולה בהרבה מתאוצת החללית כלפיו.

באופן דומה, תנועת גוף על פני כדור הארץ לא יכולה להתרחש בלי השפעה הדדית בין הגוף לבין גופים אחרים סביבו. נסביר זאת עבור מקרים שונים בתת-סעיפים הבאים.

7.2 הליכה

אם נתבונן באדם שהולך, נגלה שקיימת אינטראקציה בין האדם והקרקע, שבמהלכה האדם שהולך (נניח, לכיוון צפון) מפעיל באמצעות רגליו כוח על הקרקע בכיוון דרום וזאת כפי שמתואר באיור 12, ובו בזמן, על פי החוק השלישי של ניוטון, הקרקע מפעילה על הרגליים (על האדם) כוח זהה



איור 12: במהלך ההליכה, האדם מפעיל על הקרקע כוח f_s בכיוון המנוגד לתנועה, והקרקע מפעילה על האדם כוח f'_s בכיוון התנועה.

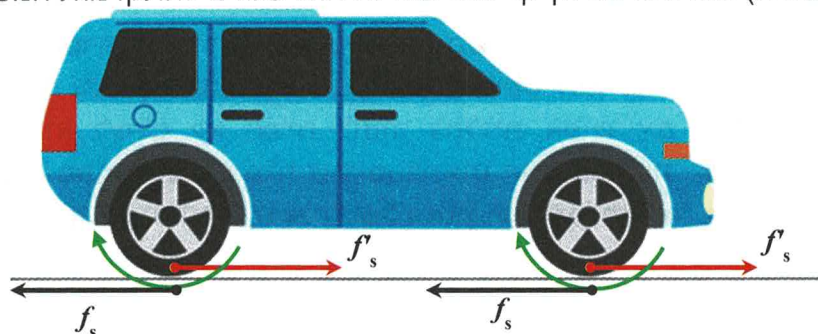
בכיוון צפון. כוח זה הוא שגורם לתנועת האדם.

הכוח שהאדם מפעיל על הקרקע באמצעות רגליו הוא כוח חיכוך סטטי, כי במהלך ההליכה הנעל (או כף הרגל, אם האדם יחף) נאחזת בקרקע ואינה מחליקה עליה. האדם מפעיל על הקרקע באמצעות רגליו כוח חיכוך סטטי f_s בכיוון המנוגד לתנועה, והקרקע מפעילה על האדם כוח f'_s בכיוון התנועה, כוח הזה בגודלו ל- f_s . כוח זה הוא שגורם לתנועת האדם (ראה איור 12).

אם לא הייתה אינטראקציה בין רגלי האדם לקרקע, הוא לא יוכל היה לנוע, כי במקרה זה לא היה פועל עליו כוח בכיוון התנועה. לדוגמה אם האדם נמצא על משטח חלק (קרח, לדוגמה), הוא לא יוכל להפעיל כוח על הקרקע, וכתוצאה מכך לא היה מופעל עליו הכוח הדרוש לתנועתו.

7.3 תנועת המכונית

אחת התפיסות השגויות לגבי פעולת מנוע המכונית היא שמנוע המכונית מפעיל כוח על המכונית בכיוון תנועת המכונית, וכוח זה הוא שגורם למכונית להתקדם. המצב לא כך. מנוע המכונית גורם לסיבוב גלגלי המכונית, ובכך הוא גורם להפעלת כוח על ידי הצמיגים על הכביש בכיוון המנוגד לכיוון הנסיעה, כפי שמתואר באיור 13, ועל פי החוק השלישי של ניוטון, הכביש מפעיל על צמיגי המכונית (על המכונית) כוח זה בכיוון קדימה. כוח זה הוא שגורם להתקדמות המכונית.

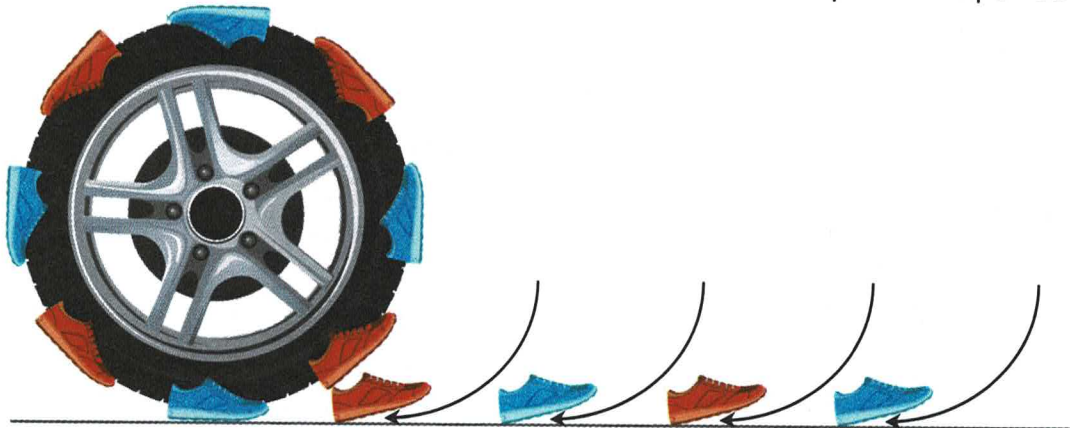


איור 13: מנוע המכונית גורם לסיבוב גלגלי המכונית. הסיבוב גורם להפעלת כוח על הכביש (במקרה זה) בכיוון שמאל, וכתגובה הכביש מפעיל על הגלגלים (צמיגים) כוח בכיוון ימין.

הכוחות הפועלים בין צמיגי המכונית והכביש הם כוחות חיכוך סטטי. בנסיעה רגילה, במהלך סיבוב הגלגל (הצמיג) אינו מחליק, אלא "נאחז" בכביש. בכך הוא מפעיל על הכביש כוח חיכוך סטטי f_s בכיוון המנוגד לכיוון הנסיעה, ובו בזמן הכביש מפעיל על הצמיגים (על המכונית) כוח f'_s בכיוון הנסיעה (ראה איור 13).

סיבוב הגלגל על הכביש הוא תהליך זהה בתכליתו לתהליך ההליכה של האדם. על מנת להבהיר נקודה זאת, ניקח גלגל ונצמיד להיקפו החיצוני נעליים זהות במרחקים זהים כפי שמתואר באיור 14.

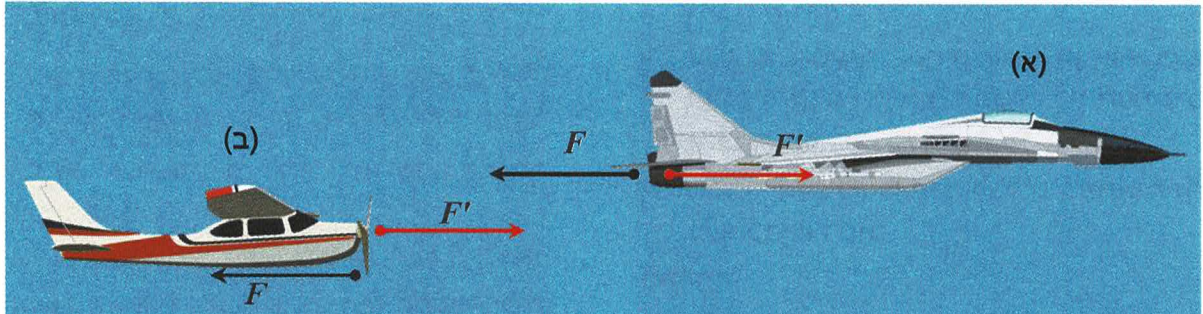
כאשר מסובבים את הגלגל והוא מתקדם על הקרקע, נמצא שהנעליים דורכות על הקרקע זו אחר זו בדיוק כפי שקורה בתהליך ההליכה של האדם.



איור 14: סיבוב הגלגל על הכביש הוא תהליך זהה בתכליתו לתהליך ההליכה של האדם.

7.4 תנועת מטוסים

מטוסים מונעים כיום על ידי שני סוגים עיקריים של מנועים: מנועי סילון ומנועים המסובבים להבים (מנועי בוכנה). בסוג הראשון המנוע דוחס את האוויר הנכנס אליו ופולט אותו במהירות גבוהה מאוד. בתהליך זה המנוע מפעיל כוח עצום על האוויר הנפלט, והאוויר, על פי החוק השלישי של ניוטון, מפעיל בו בזמן כוח זהה על המנוע (על המטוס) ובכך המטוס נדחף קדימה כמתואר באיור 15א.



איור 15: (א) מטוס מונע על ידי מנוע סילון. (ב) מטוס מונע על ידי סיבוב להבים.

בסוג השני המנוע מסובב להבים במהירות גבוהה מאוד. בגלל צורתם, הלהבים מפעילים כוח על האוויר בכיוון המנוגד לכיוון הטיסה, ועל פי החוק השלישי של ניוטון, האוויר מפעיל כוח זהה על הלהבים (כלומר על המטוס) בכיוון הטיסה שגורם לתנועת המטוס, כפי שמתואר באיור 15ב.

דוגמאות חישוביות לתנועה באמצעות כוח החיכוך

דוגמה 1

מכונית מתחילה לנוע ממנוחה על כביש ישר ואופקי בתאוצה קבועה a .

נתון: מסת המכונית m ומקדם החיכוך הסטטי בין צמיגיה לכביש הוא μ_s .

א. בטא את כוח החיכוך הסטטי השקול, f_s , שמפעילים צמיגי המכונית על הכביש באמצעות מסת המכונית m ותאוצתה a .

ב. רשום ביטוי לתאוצה המקסימלית האפשרית, $a_{\max}$, על מנת שהצמיגים לא יחליקו על הכביש במהלך הנסיעה. בטא תשובתך באמצעות הגדלים μ_s ו- g .

נתון שמסת המכונית $2,000 \text{ kg}$.

ג. חשב את גודלו של כוח החיכוך הסטטי שהצמיגים מפעילים על הכביש כאשר

לכן אם המכונית תזנק בתאוצה גדולה על כביש רטוב, תאוצת המכונית עלולה להיות גדולה מהתאוצה המקסימלית המותרת, והצמיגים יחליקו במהלך סיבובם.

דוגמה 2

מכונית שמסתה $m = 2000 \text{ kg}$ נוסעת על כביש אופקי וישר במהירות קבועה. ברגע מסוים הנהג בולם והמכונית מתחילה להאט את מהירותה בקצב קבוע של 5 m/s^2 עד לעצירה מוחלטת. נתון שבמהלך כל תהליך העצירה הצמיגים שומרים על אחיזה בכביש ואינם מחליקים.

א. תאר את האינטראקציה הנוצרת בין צמיגי המכונית והכביש במהלך תהליך ההאטה של המכונית וחשב את גודלו של החיכוך הסטטי שהכביש מפעיל על הצמיגים במקרה זה.

ב. חשב את התאוצה המקסימלית (בערכה המוחלט) האפשרית עבור המכונית על מנת שהצמיגים לא יחליקו על הכביש אם נתון שמקדם החיכוך הסטטי בין הצמיגים והכביש הוא 0.9.

ג. ענה על הסעיף הקודם אם נתון שהכביש רטוב ומקדם החיכוך הסטטי בין הצמיגים והכביש יורד ל-0.5.

ד. הסבר למה לא מומלץ לבלום בפתאומיות כשהכביש רטוב.

פתרון:

א. כאשר הנהג בולם ומהירות הסיבוב של הגלגלים יורדת, הרכב מאט. בתהליך זה הצמיגים מפעילים על הכביש כוח חיכוך סטטי בכיוון תנועת המכונית, והכביש, על פי החוק השלישי של ניוטון, מפעיל על הצמיגים כוח חיכוך סטטי זהה בכיוון ההפוך (אחורה). כוח זה הוא שגורם להאטת המכונית.

לחישוב כוח זה, נבחר את הכיוון החיובי בכיוון תנועת המכונית וניעזר בחוק השני של ניוטון ונקבל:

$$f_s = ma = 2000(-5) = -10,000 \text{ N}$$

ב. על מנת שהצמיגים לא יחליקו צריך להתקיים:

$$|f_s| \leq f_{s \max}$$

המכונית נוסעת בתאוצה שגודלה 2 m/s^2 .

ד. חשב את $a_{\max}$ במקרה בו הכביש רטוב, כך ש- $\mu_s = 0.6$, ועבור כביש יבש שעבורו $\mu_s = 1$.

ה. על סמך התשובות שקיבלת בסעיף הקודם, הסבר מדוע לא מומלץ למכונית "לזנק" בתאוצה גבוהה כשהכביש רטוב.

פתרון:

א. כוח החיכוך הסטטי הפועל על צמיגי המכונית בכיוון התנועה ואשר גורם למכונית לנוע בתאוצה a , נתון על פי החוק השני של ניוטון על ידי הביטוי:

$$f_s = ma$$

על פי החוק השלישי של ניוטון, המכונית מפעילה על הכביש כוח זהה בכיוון אחורה. כלומר כוח שגודלו ma בכיוון אחורה.

ב. על מנת שצמיגי המכונית לא יחליקו במהלך סיבובם על הכביש צריך להתקיים ש- f_s הדרוש לתנועת המכונית בתאוצה a קטן או שווה ל- $f_{s \max}$:

$$f_s \leq f_{s \max}$$

מכיוון ש: $f_{s \max} = \mu_s mg$ ו- $f_s = ma$, נקבל שהתנאי שהצמיגים לא יחליקו במהלך סיבובם הוא:

$$ma \leq \mu_s mg \Rightarrow a \leq \mu_s g$$

מהקשר האחרון נקבל שהתאוצה המקסימלית האפשרית למכונית על מנת שהצמיגים לא יחליקו במהלך סיבובם (לא יתנתקו מהכביש) היא:

$$a_{\max} = \mu_s g$$

ג. על פי התוצאה שהתקבלה בסעיף א' נקבל:

$$f_s = ma = 2000(2) = 4,000 \text{ N}$$

ד. על פי התוצאה שהתקבלה בסעיף ב' נקבל עבור $\mu_s = 0.6$:

$$a_{\max} = \mu_s g = 6 \text{ m/s}^2$$

ועבור $\mu_s = 1$

$$a_{\max} = \mu_s g = 10 \text{ m/s}^2$$

ה. כאשר הכביש רטוב, התאוצה המקסימלית המותרת על מנת שהצמיגים לא יחליקו תקטן.

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

מכיוון שבשאלה זו מדובר על תאווה נבחר בסימן השלילי.

$$a = -9 \text{ m/s}^2$$

ג. מהקשר שהתקבל בסעיף הקודם נקבל:

$$|a| = \mu_s g = 0.5(10) = 5 \text{ m/s}^2$$

$$\Rightarrow a = -5 \text{ m/s}^2$$

ד. על פי הניתוח בסעיף הקודם מתקבל שכל שמקדם החיכוך הסטטי קטן יותר, התאווה המקסימלית המותרת על מנת שהמכונית לא תחליק במהלך עצירתה קטנה. לכן אם בולמים בפתאומיות (התאווה גדולה) קיימת סכנת החלקה.

הצבנו f_s בערך מוחלט כי ערכו שלילי, בהתייחס לציר שבחרנו.

מהקשר האחרון נקבל שעל מנת שהמכונית לא תחליק צריך להתקיים התנאי:

$$|ma| \leq \mu_s mg \Rightarrow |a| \leq \mu_s g$$

מהקשר האחרון נקבל שהערך המקסימלי המותר עבור התאוצה בערכה המוחלט (התאווה) על מנת שהמכונית לא תחליק הוא:

$$|a| = \mu_s g = 0.9(10) = 9 \text{ m/s}^2$$

מהקשר האחרון נקבל:

$$a = \pm 9 \text{ m/s}^2$$

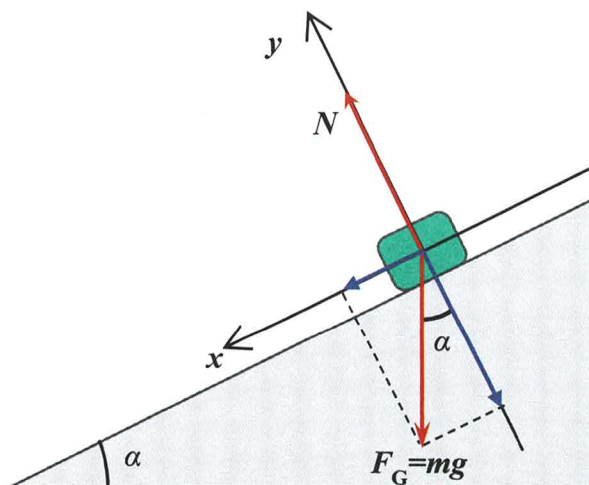
8. בחירת מערכת צירים

כאשר מנתחים בעיות באמצעות חוקי ניוטון, יש צורך בבחירת מערכת צירים. מכיוון שאנחנו עוסקים בבעיות שבהן הגוף נע במישור ולא במרחב, נצטרך למערכת צירים דו ממדית (xy) . עקרונית, ניתן לבחור מערכת צירים xy כל שהיא. אבל הניסיון מלמד אותנו שבבעיות מסוימות ישנן מערכות צירים המאפשרות לנו להגיע לפתרון במהירות וביעילות גבוהות יותר מאשר מערכות אחרות.

כאשר מנתחים בעיות בסיוע חוקי ניוטון, ישנם שני כללים חשובים שעוזרים לנו בבחירת מערכת צירים נוחה.

כלל ראשון: אם הגוף נע בתאוצה (כלומר כאשר מתקיים החוק השני של ניוטון), מומלץ לבחור את אחד הצירים (נניח ציר x) בכיוון התאוצה, וכמובן שהציר האחר (ציר y) ניצב לו. לדוגמה, כאשר גוף נע בתאוצה על מישור משופע, כפי שמתואר באיור 16.

מערכת צירים כזו מאפשרת הפרדה בין החוק השני של ניוטון והחוק הראשון של ניוטון. בכיוון ציר x מתקיים $\Sigma F_x = ma$ ובכיוון ציר y מתקיים $\Sigma F_y = 0$. הפרדה זו מקלה בפתרון הבעיה מבחינה מתמטית.



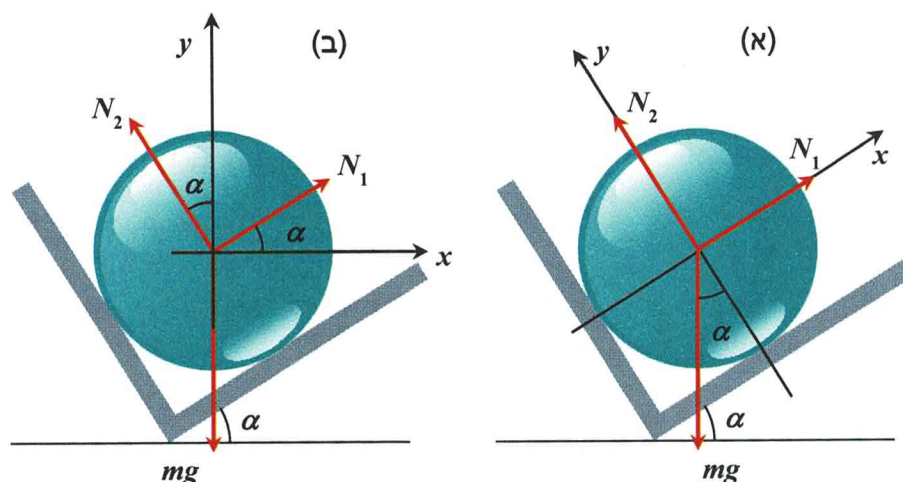
איור 16: כאשר הגוף נע בתאוצה בוחרים את אחד הצירים בכיוון התאוצה ואת הציר האחר ניצב לו.

כלל שני: אם הגוף נמצא במצב שיווי משקל, נבחר מערכת צירים xy שבה מספר הכוחות המקביל לצירה הוא מרבי. מערכת זו נוחה, כי בה נצטרך לפרק מספר קטן יותר של כוחות לרכיביהם הניצבים.

דוגמה למקרה היא הבעיה של כדור הנתמך בשני מישורים ניצבים זה לזה, שאחד מהם יוצר עם הרצפה זווית α כמתואר באיור 17. הכוחות הפועלים על הכדור הם הכוחות N_1 , N_2 וכוח הכובד mg (ראה איור 17). אם נבחר את מערכת הצירים המתוארת באיור 17, שבה נמצא המספר הגדול ביותר של הכוחות על הצירים, נגלה שפתרון בעיה זו הופך לקל ביותר. מתוך

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

התנאי $\Sigma F_x = 0$ נקבל: $N_1 = mg \sin \alpha$ ומתוך התנאי $\Sigma F_y = 0$ נקבל $N_2 = mg \cos \alpha$.



איור 17: (א) מערכת צירים שבה נמצאים רוב הכוחות על הצירים. (ב) מערכת הצירים שבה רוב הכוחות לא נמצאים על הצירים.

לעומת זאת, אם נבחר מערכת צירים אחרת (לדוגמה מערכת הצירים המתוארת באיור 17ב, פתרון בעיה זו נעשה קשה יותר. במקרה זה נקבל מהתנאי $\Sigma F_x = 0$: $N_1 \cos \alpha = N_2 \sin \alpha$, ומהתנאי $\Sigma F_y = 0$ נקבל: $N_1 \sin \alpha + N_2 \cos \alpha = mg$. למציאת N_1 ו- N_2 נצטרך לפתור את מערכת המשוואות הבאה:

$$\begin{cases} N_1 \cos \alpha = N_2 \sin \alpha \\ N_1 \sin \alpha + N_2 \cos \alpha = mg \end{cases}$$

ברור שהפתרון באמצעות מערכת הצירים שבאיור 17ב קשה יותר.

סיכום פרק 7

1. החוק השני של ניוטון: אם פועל כוח שקול על גוף מסוים, הגוף נע בתאוצה המכוונת בכיוון הכוח השקול. תאוצה זו נמצאת ביחס ישר לכוח השקול וביחס הפוך למסת הגוף.
2. הניסוח המתמטי של החוק השני של ניוטון הוא: $\vec{a} \propto \Sigma \vec{F} / m$. מקשר זה מתקבל: $\Sigma \vec{F} \propto m\vec{a}$.
3. יחידת הכוח מוגדרת כך שמתקיים הקשר $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$. על פי זה יחידת הכוח היא: kg m/s^2 . יחידה זאת נקראת ניוטון ומסומנת באות N: $1\text{ N} = \text{kg m/s}^2$. לכן יחידת הניוטון מבטאת את גודלו של הכוח אשר אם יופעל על גוף שמסתו קילוגרם אחד, יגרום לו לנוע בתאוצה של 1 m/s^2 .
4. על פי החוק השני של ניוטון, אם כוח F מופעל על גוף שמסתו m וגורם לו לנוע בתאוצה a, גודלו של כוח זה נתון על ידי: $F = ma$. באותה דרך, גודלו של כוח הכובד, F_G , הפועל על גוף מסוים, שווה למכפלת מסת גוף זה, m, בתאוצת הגוף a הנוצרת בהשפעת כוח הכובד. מכיוון שתאוצת הגופים הנעים בהשפעת כוח הכובד (תאוצת הכובד) היא $g = 9.8\text{ m/s}^2$, נקבל על פי החוק השני של ניוטון שכוח הכובד הפועל על גוף שמסתו m נתון על ידי: $F_G = mg$.
5. מערכת הצירים המתאימה ביותר לשימוש בחוק השני של ניוטון עבור גוף הנע בתאוצה על מישור משופע היא המערכת שבה ציר x בכיוון התאוצה (בכיוון מקביל למישור המשופע) וציר y ניצב למישור המשופע.
6. הכוח הנורמלי הפועל על גוף הנמצא על מישור משופע נתון על ידי $N = mg \cos \alpha$, כאשר α היא זווית השיפוע של המישור המשופע. אם המישור המשופע חלק, הגוף נע על המישור המשופע בתאוצה הנתונה על ידי הביטוי: $a = g \sin \alpha$.
7. אם הגוף מונח על מישור משופע לא חלק, אז אם מתקיים התנאי ש- $F_{Gx} \leq f_{s \max}$, כאשר $F_{Gx} = mg \sin \alpha$ ו- $f_{s \max} = \mu_s N = \mu_s mg \cos \alpha$, הוא הערך המקסימלי עבור החיכוך הסטטי בין הגוף למשטח, הגוף נשאר במנוחה. במקרה זה פועל על הגוף כוח חיכוך סטטי f_s בכיוון מעלה המישור המשופע אשר נתון על ידי הביטוי: $f_s = mg \sin \alpha$.
8. אם מתקיים $F_{Gx} > f_{s \max}$ אז הגוף המונח על המישור המשופע נע בתאוצה במורד המישור המשופע. תאוצה זו נתונה על ידי: $a = g(\sin \alpha - \mu_k \cos \alpha)$ כאשר בחרנו מערכת צירים xy שבה ציר x מקביל למישור המשופע שכיוונו בכיוון מורד המישור המשופע, וציר y ניצב לו (ניצב למישור המשופע).
9. אם מניחים גוף על מישור משופע לא חלק ומקנים לו מהירות התחלתית בכיוון מעלה המישור המשופע, הגוף ינוע בתאוצה (בתאוצה שלילית במערכת הצירים xy הנ"ל). במקרה זה כיוון כוח החיכוך הקינטי f_k הוא בכיוון רכיב כוח הכובד (F_{Gx}). תאוצת הגוף בתנועתו במעלה המישור המשופע נתונה במקרה זה, במערכת הצירים xy הנ"ל, על ידי הביטוי: $a = g(\sin \alpha + \mu_k \cos \alpha)$.
10. כוח הכובד שכדור הארץ מפעיל על גוף מסוים בסביבתו תלוי במסת הגוף m, במסת כדור הארץ M_E , ובמרחק הגוף ממרכז כדור הארץ, r. מסת כדור הארץ קבועה, ועל פני כדור הארץ r קבוע ושווה לרדיוס כדור הארץ שהוא בקירוב $R_E = 6,380\text{ km}$. במקרה זה כוח הכובד תלוי במסת הגוף בלבד, והוא נתון, על פי החוק השני של ניוטון, על ידי הביטוי: $F_G = mg$, כאשר g היא תאוצת הכובד על פני כדור הארץ.
11. משקלו של גוף מוגדר באופן הבא: הוא התוצאה המתקבלת משקילת הגוף, כלומר הקריאה המתקבלת כאשר מניחים את הגוף על מאזני כוח או מד כוח. גודל זה מסומן באות W מהלועזית Weight.
12. משקלו של גוף מייצג את הכוח שהגוף מפעיל על מד הכוח. זהו כוח השווה בגודלו לכוח הנורמלי N שהמאזניים מפעילים על הגוף במקרה והגוף מונח על מאזני כוח, או שווה לכוח F_{sp} שהקפיץ מפעיל על הגוף במקרה שבו הגוף תלוי על קפיץ.
13. משקלו של הגוף שווה לכוח הכובד כאשר מתקיים $N = F_G$ עבור מאזני הכוח, או $F_{sp} = F_G$ עבור הדינמומטר.
14. התנאי הראשון ($N = F_G$) מתקיים כאשר מתקיימים התנאים הבאים: המאזניים מונחים

הראשון, או בגלל שעל הגוף האחר פועלים כוחות נוספים שמונעים ממנו לנוע). ללא אינטראקציה לא יפעל כוח על הגוף, והוא לא יוכל לנוע.

21. כאשר אדם הולך, קיימת אינטראקציה בין האדם והקרקע, שבמהלכה האדם מפעיל באמצעות רגליו כוח על הקרקע, ובו בזמן, על פי החוק השלישי של ניוטון, הקרקע מפעילה על הרגליים (על האדם) כוח זהה בכיוון הנגדי. כוח זה הוא שגורם לתנועת האדם. הכוח שהאדם מפעיל על הקרקע באמצעות רגליו הוא כוח חיכוך סטטי, כי במהלך ההליכה הנעל נאחזת בקרקע ואינה מחליקה עליה. האדם מפעיל על הקרקע באמצעות רגליו כוח חיכוך סטטי f_s בכיוון המנוגד לכיוון התנועה, והקרקע מפעילה על האדם כוח f'_s בכיוון התנועה, כוח הזהה בגודלו ל- f_s .

22. מנוע המכונית אינו מפעיל כוח על המכונית בכיוון תנועת המכונית. מנוע המכונית גורם לסיבוב גלגלי המכונית, ובכך הוא גורם להפעלת כוח על ידי הצמיגים על הכביש בכיוון המנוגד לכיוון הנסיעה, ועל פי החוק השלישי של ניוטון, הכביש מפעיל על צמיגי המכונית (על המכונית) כוח זהה בכיוון קדימה. כוח זה הוא שגורם להתקדמות המכונית.

23. הכוחות הפועלים בין צמיגי המכונית והכביש הם כוחות חיכוך סטטי. כי במהלך נסיעה רגילה, הגלגל (הצמיג) אינו מחליק, אלא "נאחז" בכביש. בכך הוא מפעיל על הכביש כוח חיכוך סטטי f_s בכיוון המנוגד לכיוון הנסיעה, ובו בזמן הכביש מפעיל על הצמיגים (על המכונית) כוח f'_s בכיוון הנסיעה.

על משטח אופקי, הכוחות היחידים הפועלים על הגוף הם N ו- F_G והגוף נמצא בשיווי משקל.

15. התנאי השני ($F_{sp} = F_G$) מתקיים כאשר מתקיימים התנאים הבאים: הכוחות היחידים הפועלים על הגוף הקשור לדינמומטר הם F_G ו- F_{sp} והגוף נמצא במצב שווי משקל.

16. במקרים שבהם מתקיים ש- $N \neq F_G$ או $F_{sp} \neq F_G$, משקלו של הגוף שונה מכוח הכובד שפועל על הגוף ($W \neq F_G$).

17. משקלו של גוף הנמצא בתוך מעלית הנעה בתאוצה a נתון על ידי הביטוי:

$$W = m(g + a)$$

18. על פי החוק השני של ניוטון, שינוי מהירותו של גוף מחייב הפעלת כוח על הגוף. לכן על מנת להניע גוף הנמצא במנוחה על פני כדור הארץ יש להפעיל עליו כוח.

19. על פי החוק הראשון של ניוטון, על מנת שהגוף יתמיד בתנועה במהירות קבועה, סכום הכוחות עליו חייב להתאפס. מכיוון שבתנועה על פני כדור הארץ תמיד פועלים על הגוף כוחות חיכוך שכיוונם מנוגד לכיוון המהירות (חיכוך עם האוויר או המשטח עליו נע הגוף), תמיד יש צורך בהפעלת כוח על הגוף כנגד כוחות החיכוך על מנת לגרום לו להמשיך בתנועה במהירות קבועה, אחרת הגוף יעצר תוך פרק זמן מסוים.

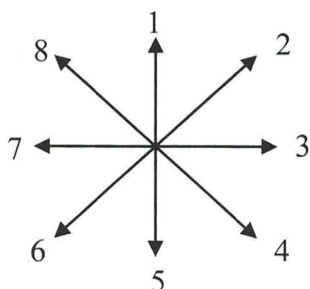
20. הפעלת כוח על הגוף מחייבת אינטראקציה בין גוף זה לגוף אחר. אינטראקציה זו היא שגורמת להפעלת כוחות אינטראקציה (כוחות פעולה ותגובה) על שני הגופים. כתוצאה מכוחות אלה שני הגופים נעים זה לקראת זה (לפעמים רק אחד הגופים הוא שנע בגלל שמסת הגוף האחר גדולה מאוד ביחס לגוף

תרגילים ובעיות – פרק 7

1. החוק השני של ניוטון

השקול הפועל עליו בחלקים השונים של המסלול. היעזר בתרשים החיצים המצורף.

החלק	כיוון המהירות	כיוון התאוצה	כיוון הכוח השקול
AB			
BC			
CD			



5.

שני גופים 1 ו-2 נעים על משטח חלק במהירות קבועה של 4 m/s . החל מרגע מסוים, ולפרק זמן זהה, מפעילים על כל אחד משני הגופים כוח זהה F שכיוונו בכיוון המהירות. בסוף פרק זמן זה הגוף הראשון מגיע למהירות של 10 m/s והגוף השני מגיע למהירות של 16 m/s .

א. קבע למי מבין שני הגופים יש מסה גדולה יותר. הסבר את תשובתך.
ב. חשב את היחס בין המסות של שני הגופים.

6.

הסבר באמצעות החוק השני של ניוטון כיצד מפחיתה כרית האוויר ברכב את הפגיעות בגוף במהלך התאונה.

2. כוח הכובד והחוק השני של ניוטון

7.

נתון גוף שמסתו 4 kg . חשב את כוח הכובד הפועל עליו כאשר הגוף נמצא:

- על פני כדור הארץ.
- בגובה 2000 km מעל פני כדור הארץ.
- על פני הירח. נתון שתאוצת הכובד על פני הירח היא 1.67 m/s^2 .
- על פני צדק. נתון שתאוצת הכובד על פני צדק היא 25 m/s^2 .

1.

- רשום במלים את החוק השני של ניוטון.
- רשום את החוק השני של ניוטון כביטוי מתמטי.
- מהי יחידת הכוח במערכת היחידות SI וציין מהי המשמעות הפיזיקלית של יחידה זו.

2.

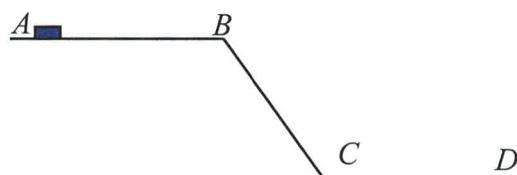
- האם בהכרח כיוון תאוצתו של גוף הוא בכיוון הכוח השקול הפועל עליו? תן דוגמאות.
- האם בהכרח כיוון מהירותו של גוף הוא בכיוון הכוח השקול הפועל עליו? תן דוגמאות.

3.

- קבע אילו מבין המשפטים הבאים נכונים ואילו אינם נכונים:
א. הכוח השקול הפועל על גוף הנע בתאוצה קבועה יכול להתאפס.
ב. הכוח השקול הפועל על הגוף מכוון תמיד בכיוון תאוצת הגוף.
ג. הכוח השקול הפועל על הגוף מכוון תמיד בכיוון מהירות הגוף.
ד. הגוף נע תמיד בכיוון תאוצתו.
ה. מהירות גוף הנע בתאוצה יכולה להתאפס ברגע מסוים במהלך תנועת הגוף.

4.

בתרשים שלפניך מתואר מסלול ABCD. נתון שהקטעים AB ו-BC חלקים ושהקטע CD אינו חלק. מעניקים לגוף המונח בנקודה A מהירות התחלתית בכיוון אופקי ימינה.



קבע באמצעות השלמת הטבלה הבאה את כיוון מהירות הגוף, כיוון תאוצתו וכיוון הכוח

8.

קושרים גוף שמסתו 5 kg לקצה חוט חסר מסה ומפעילים על הקצה האחר של החוט כוח קבוע כלפי מעלה. כתוצאה מכך הגוף נע כלפי מעלה בתאוצה קבועה שגודלה 4 m/s^2 .
א. חשב את המתיחות בחוט.

ב. נתון שהמתיחות המקסימלית שהחוט יכול לשאת היא 90 N . חשב את התאוצה המקסימלית בה הגוף יכול לנוע כלפי מעלה מבלי שהחוט ייקרע.

9.

גוף שמסתו $m = 0.4\text{ kg}$ מונח על משטח אופקי. ב- $t = 0$ מפעילים על הגוף כוח שגודלו 6 N בכיוון אנכי כלפי מעלה. הכוח פועל במשך שתי שניות. בחר את הכיוון החיובי של ציר y כלפי מעלה ואת $y = 0$ על פני המשטח, וענה על השאלות הבאות:

א. חשב את תאוצת הגוף במהלך פעולת הכוח.

ב. חשב את מהירות הגוף ב- $t = 2\text{ s}$.

ג. חשב את מיקום הגוף ב- $t = 2\text{ s}$.

ד. חשב את הזמן שבו הגוף מגיע לגובה המקסימלי מעל למשטח.

ה. חשב את הגובה המקסימלי אליו מגיע הגוף ביחס לפני המשטח.

10.

קושרים גוף שמסתו m לקצה חוט ומחזיקים בקצה האחר שלו כך שהגוף נמצא באוויר. בארבעת הסעיפים הבאים השווה בין המתיחות בחוט בכל אחד משני המצבים המתוארים בכל סעיף.

א. כאשר מחזיקים את הגוף במנוחה או כאשר מושכים אותו כלפי מעלה במהירות קבועה.

ב. כאשר מושכים את הגוף כלפי מעלה במהירות קבועה או מורידים אותו כלפי מעלה במהירות קבועה.

ג. כאשר מושכים את הגוף כלפי מעלה במהירות קבועה או מושכים אותו כלפי מעלה בתאוצה קבועה.

ד. כאשר מושכים את הגוף כלפי מעלה במהירות קבועה או מורידים אותו כלפי

מטה בתאוצה קבועה.

11.

קליע שמסתו 20 g נורה מרובה. נתון שאורך קנה הרובה 50 cm ו-"מהירות הלוע", שהיא המהירות שבה הקליע יוצא מהקנה היא 450 m/s .

א. חשב את התאוצה הממוצעת של הקליע במהלך תנועתו בקנה הרובה.

ב. חשב את הכוח הממוצע הפועל על הקליע במהלך תנועתו בקנה הרובה.

12.

קליע שמסתו 20 g עובר דרך קורת עץ שעובייה 15 cm . הקליע נכנס לקורה בניצב לה במהירות שגודלה 320 m/s ויוצא מצדה האחר במהירות שגודלה 20 m/s .

א. חשב את התאוצה הממוצעת של הקליע במהלך תנועתו דרך קורת העץ.

ב. חשב את הכוח הממוצע הפועל על הקליע במהלך תנועתו דרך קורת העץ.

13.

נתון משטח אופקי, שחלקו חלק וחלקו לא חלק (כלומר מחוספס). גוף שמסתו 1.5 kg נע על החלק החלק של המשטח במהירות קבועה של 12 m/s . במהלך תנועתו הגוף נכנס לאזור הלא חלק בזמן שנבחר להיות $t = 0$, וכתוצאה מכך הוא מתחיל להאט. מקדם החיכוך הקינטי בין הגוף למשטח שווה ל- 0.4 . בחר את הכיוון החיובי של ציר x בכיוון תנועת הגוף, ואת $x = 0$ להיות מיקום הגוף ברגע $t = 0$.

א. חשב את תאוצת הגוף.

ב. חשב את הזמן שבו הגוף נעצר.

ג. חשב את מיקום הנקודה בה הגוף נעצר.

14.

גוף שמסתו 6 kg מונח על משטח אופקי לא חלק. מפעילים על הגוף כוח F היוצר זווית בת 60° עם המשטח.

מקדמי החיכוך הסטטי וקינטי בין הגוף למשטח הם 0.9 ו- 0.4 , בהתאמה.

א. חשב את גודלו המקסימלי של הכוח F ($F_{\max}$) על מנת שהגוף יישאר במנוחה.

ב. נתון שגודלו של הכוח F הוא 30 N .

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

$a(m/s^2)$	$F(N)$
2	4
4	8
6	12
8	16
10	20

- א. שרטט גרף המתאר את תאוצת הגוף, a , כפונקציה של הכוח המופעל, F .
- ב. היעזר בחוק השני של ניוטון על מנת לפתח את הביטוי המתמטי המתאר את תאוצת הגוף a כפונקציה של הכוח F הפועל עליו בתלות במסת הגוף m .
- ג. באמצעות הגרף ששרטטת והקשר שקיבלת בסעיף הקודם חשב את מסת הגוף.
- ד. חוזרים על אותו ניסוי עם גוף אחר שמסתו כפולה מזו של הגוף m . באותה מערכת צירים בה השתמשת בסעיף א' שרטט גרף נוסף, המתאר את התוצאות של ניסוי זה. הסבר שיקולך.

18.

התלמיד חוזר על הניסוי המתואר בשאלה הקודמת עם גוף אחר ועל משטח אופקי לא חלק. להלן התוצאות שקיבל:

$a(m/s^2)$	$F(N)$
1	10
2	12
3	14
4	16
5	18

- א. שרטט גרף המתאר את תאוצת הגוף, a , כפונקציה של הכוח המופעל, F .
- ב. היעזר בחוק השני של ניוטון על מנת לפתח את הביטוי המתמטי המתאר את תאוצת הגוף a כפונקציה של הכוח F הפועל עליו בתלות במסת הגוף m ומקדם החיכוך הקינטי בין הגוף למשטח, μ_k .

- ג. התבסס על הביטוי שקיבלת בסעיף הקודם וקבע מה מייצג במקרה זה כל אחד מהגדלים הבאים הקשורים לגרף ששרטטת בסעיף א':
- שיפוע הגרף.
 - ערך הכוח בנקודת חיתוך הגרף עם

קבע האם הגוף ינוע או יישאר במנוחה. אם הגוף ינוע חשב את תאוצתו, ואם יישאר במנוחה חשב את כוח החיכוך הסטטי הפועל עליו.

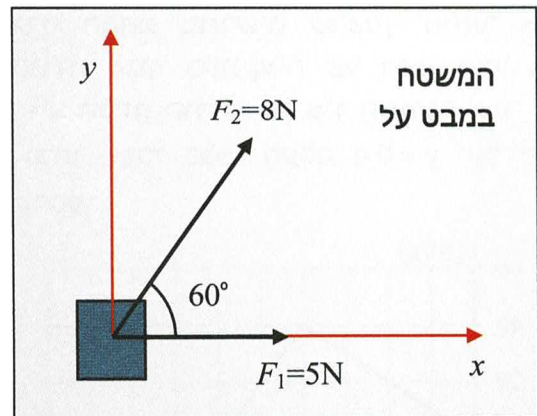
- ג. ענה על השאלה בסעיף הקודם אם נתון שגודלו של הכוח F הוא $60N$.
- ד. חשב את הגודל המקסימלי של הכוח F שעבורו הגוף אינו מתרומם מהמשטח.
- ה. חשב את תאוצת הגוף במקרה המתואר בסעיף הקודם.

15.

מקנים לגוף הנמצא על משטח אופקי לא חלק מהירות התחלתית שגודלה $6m/s$. בשל פעולת כוח החיכוך בינו לבין המשטח, הגוף נעצר לאחר עוברו $4m$. חשב את מקדם החיכוך הקינטי בין הגוף למשטח.

16.

גוף שמסתו $0.6kg$ מונח על משטח אופקי וחלק. מפעילים על הגוף שני כוחות אופקיים $\vec{F}_1$ ו- $\vec{F}_2$ (ראה תרשים).



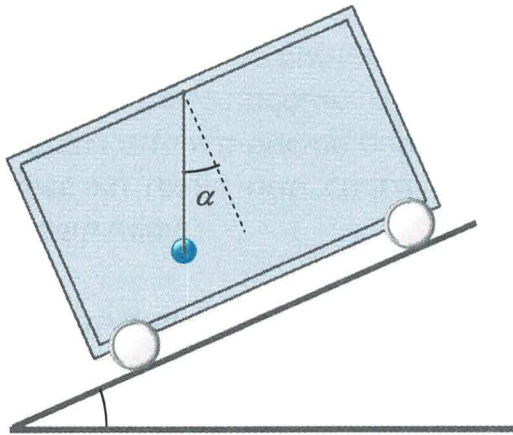
נתון שגודלו של הכוח F_1 הוא $5N$ והוא מכיוון בכיוון החיובי של ציר x , וגודלו של הכוח F_2 הוא $8N$ וכיוונו יוצר זווית בת 60° עם ציר x (ראה תרשים). חשב את תאוצת הגוף (גודל וכיוון).

17.

תלמיד עורך את הניסוי הבא:

הוא מניח גוף שמסתו m על משטח אופקי וחלק ומפעיל עליו, בזה אחר זה, כוחות אופקיים שונים. לכל כוח מופעל התלמיד מודד את תאוצת הגוף. בטבלה שלפניך מוצגות תוצאות הניסוי:

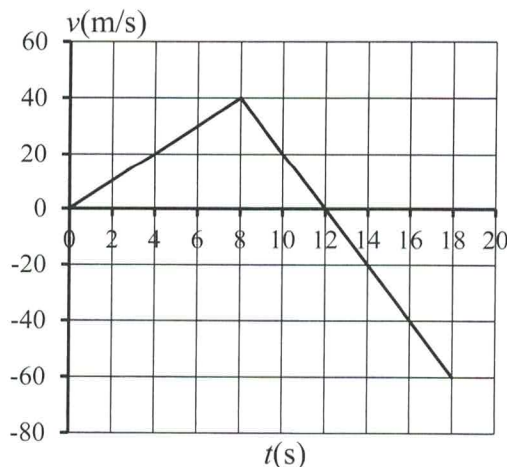
קבועה או בתאוצה קבועה. הסבר את קביעתך.
(4) האם על בסיס הנתונים ניתן לקבוע מהו כיוון תנועת העגלה? הסבר.



20.

ברגע מסוים ($t=0$) כוח F קבוע מתחיל לפעול על גוף המונח על משטח אופקי, בכיוון אנכי כלפי מעלה. הכוח מפסיק לאחר זמן מסוים, והגוף ממשיך את תנועתו בהשפעת כוח הכובד בלבד.

הגרף המוצג בתרשים שלפניך מתאר את מהירות הגוף כפונקציה של הזמן החל מ- $t=0$. הכיוון החיובי של ציר התנועה (ציר y) נבחר אנכי כלפי מעלה ו- $y=0$ על פני הקרקע.



נתון שמסת הגוף 2 kg .

- מצא על פי הגרף את הזמן שבו הכוח F חדל לפעול.
- חשב באמצעות הגרף את תאוצת הגוף כאשר פעל עליו הכוח F .
- חשב את גודלו של הכוח F שפעל על הגוף.

הציר האופקי.

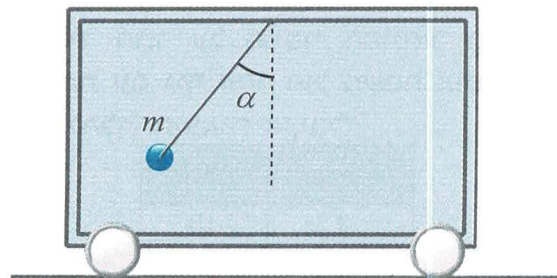
(3) נקודת חיתוך הגרף עם הציר האנכי.
ד. חשב באמצעות הגרף ששרטטת והביטוי המתמטי שקיבלת בסעיף הקודם את הגדלים הבאים:

- מסת הגוף.
- החיכוך הקינטי.
- מקדם החיכוך הקינטי.

ה. חוזרים על אותו ניסוי עם גוף אחר שמסתו גדולה פי 2. שרטט באותה מערכת צירים של הגרף שבסעיף א', גרף המתאר את התוצאות של ניסוי זה. הסבר שיקוליך (הנח שמקדם החיכוך הקינטי אינו משתנה).

19.

גוף שמסתו m קשור לתקרת עגלה באמצעות חוט שמסתו זניחה. העגלה נעה על מישור אופקי בתאוצה קבועה a . כתוצאה מכך נוצרת בין החוט לאנך זווית α קבועה כפי שמתואר בתרשים הבא:

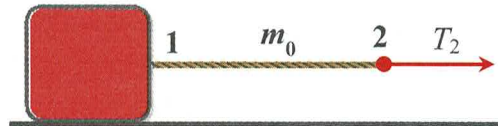


- קבע בתרשים הנ"ל את כיוון הכוח השקול הפועל על המסה m .
- קבע את כיוון תאוצת העגלה.
- האם ניתן לקבוע את כיוון מהירות העגלה? הסבר את תשובתך.
- מצא את הקשר בין הזווית α ותאוצת העגלה a .
- במקרה אחר העגלה נעה על מישור משופע. נתון שבמקרה זה החוט ניצב לאופק והזווית הנוצרת בין החוט לאנך לתקרת העגלה היא α (ראה תרשים).
- קבע האם במקרה זה המתיחות בחוט שווה לכוח הכובד (mg), קטנה ממנו או גדולה ממנו. הסבר את קביעתך.
- מצא את זווית השיפוע של המישור המשופע.
- קבע האם העגלה נעה במהירות

ג. מצא את הזמן שבו הגוף נעצר על המשטח (יחסית ל- $t=0$, רגע הפעלת הכוח).

23.

בתרשים שלפניך מתואר גוף מונח על משטח אופקי וקשור לקצה 1 של חבל שמסתו m_0 . מפעילים כוח אופקי על הקצה 2 של החבל וגורמים למערכת לנוע בתאוצה קבועה a .



א. מצא את הגודל $T_2 - T_1$, כאשר T_1 היא המתיחות בקצה 1 של החבל ו- T_2 היא המתיחות בקצה 2 של החבל. הבע את תשובתך באמצעות הגדלים m_0 ו- a .

ב. קבע באילו מקרים מתקיים $T_2 = T_1$. הסבר את תשובתך.

ג. קבע באילו מקרים מתקיים $T_2 \neq T_1$. הסבר תשובתך.

4. החוק השני של ניוטון והתנועה על מישור משופע

4.1 תנועה על מישור משופע חלק

24.

מניחים גוף שמסתו m על מישור משופע וחלק שזווית שיפועו α .

א. תאר את תנועת הגוף.
ב. הסבר למה בבעיה זו בוחרים ציר x בכיוון המישור המשופע וציר y בניצב לו (ניצב למישור המשופע).

ג. הראה שהכוח הנורמלי הפועל על הגוף נתון על ידי הגודל $mg \cos \alpha$.

ד. הראה שתאוצת הגוף על המישור המשופע נתונה על ידי הגודל $g \sin \alpha$.

25.

מניחים גוף על מישור משופע וחלק שזווית השיפוע שלו 43° ומקנים לו בזמן $t=0$ מהירות התחלתית של 12 m/s בכיוון מעלה המישור המשופע. בחר את הכיוון החיובי של ציר התנועה (ציר x) בכיוון מעלה המישור המשופע ואת $x=0$ להיות מיקום הגוף ברגע $t=0$.

א. תאר במלים את תנועת הגוף.
ב. חשב את תאוצת הגוף במהלך עלייתו.

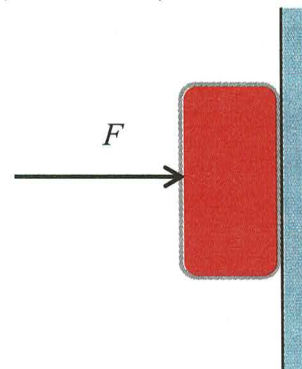
ד. מצא את מיקום הגוף בזמן שבו הכוח חדל לפעול.

ה. מצא את הזמן שבו הגוף הגיע לגובה המקסימלי מעל פני הקרקע, וחשב גובה זה.

ו. מצא את הזמן שבו הגוף חוזר לפני הקרקע וחשב את מהירותו בזמן זה.

21.

מניחים גוף שמסתו 2 kg על קיר אנכי לא חלק, ומפעילים עליו כוח אופקי F כך שהגוף נשאר במנוחה (ראה תרשים).



נתון שמקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף לקיר הם 0.8 ו- 0.4 , בהתאמה.

א. חשב את הערך המינימלי האפשרי עבור הכוח F ($F_{\min}$) על מנת שהגוף יישאר במנוחה.

ב. חשב את כוח החיכוך הסטטי הפועל על הגוף כאשר $F = 2F_{\min}$.

ג. מפעילים על הגוף כוח $F = \frac{1}{2} F_{\min}$. חשב את תאוצת הגוף במקרה זה.

ד. כשהגוף מחליק כלפי מטה בנוכחות הכוח F מגלים שישנו ערך מסוים עבור כוח זה שעבורו הגוף מחליק במהירות קבועה. חשב ערך זה.

22.

על גוף שמסתו 2.5 kg הנמצא במנוחה על משטח אופקי לא חלק מפעילים כוח אופקי קבוע שגודלו 20 N . משך פעולת הכוח הוא 5 שניות. נתון שמקדמי החיכוך הקינטי והסטטי בין הגוף למשטח הם 0.3 ו- 0.6 , בהתאמה.

א. הראה שהגוף נע בהשפעת הכוח המופעל עליו.

ב. חשב את תאוצת הגוף.

ובמהלך חזרתו.

ג. חשב את הזמן שבו הגוף נעצר רגעית ומצא את מיקומו בזמן זה.

ד. חשב את הזמן שבו הגוף חוזר לנקודת המוצא וחשב את מהירותו בזמן זה.

26.

גוף מחליק ממנוחה על מישור משופע וחלק. נתון שמהירות הגוף לאחר עוברו 180cm היא 4m/s. חשב את זווית השיפוע של המישור המשופע.

4.2 תנועה על מישור משופע לא חלק

27.

גוף שמסתו m נמצא במנוחה על מישור משופע לא חלק. נתון שזווית השיפוע של המישור היא α ושמקדם החיכוך הסטטי בין הגוף והמשטח הוא μ_s .

א. שרטט תרשים של הכוחות הפועלים על הגוף במקרה הנתון.

ב. בטא את הכוחות הפועלים על הגוף באמצעות נתוני הבעיה – כולם או חלקם.

ג. מצא את התנאי הדרוש על מנת שהגוף יישאר במנוחה. בטא את תשובתך באמצעות נתוני הבעיה – כולם או חלקם.

ד. מצא את הערך המינימלי של מקדם החיכוך הסטטי ($\mu_{s\min}$) על מנת שהגוף לא יחליק על המישור המשופע. בטא את תשובתך באמצעות הזווית α .

28.

מניחים גוף על מישור משופע לא חלק שזוויתו α , ומקנים לו מהירות התחלתית בכיוון מעלה המישור המשופע. הגוף נע בתאוצה על המישור המשופע עד שהוא נעצר רגעית, ולאחר מכן הוא חוזר במורד המישור בתאוצה.

נתון שמקדם החיכוך הקינטי בין הגוף למשטח הוא μ_k .

הכיוון החיובי של ציר התנועה (ציר x) נקבע בכיוון מעלה המישור המשופע.

א. בטא את תאוצת הגוף במהלך עלייתו, תוך שימוש בגדלים μ_s , α ותאוצת הכובד g .

ב. בטא את תאוצת הגוף במהלך ירידתו, תוך שימוש בגדלים μ_s , α ותאוצת הכובד g .

הכובד g .

ג. הסתמך על שיקולים פיזיקליים והסבר מדוע במקרה זה תאוצת הגוף בעלייה שונה מתאוצתו בירידה.

29.

מניחים גוף על מישור משופע לא חלק ומקנים לו מהירות התחלתית בכיוון מעלה המישור המשופע. הגוף עולה, נעצר רגעית וחוזר לנקודת ההתחלה.

א. מי משני הזמנים גדול יותר, זמן עליית הגוף עד לעצירה הרגעית, או זמן חזרתו מנקודת העצירה הרגעית לנקודת המוצא? הסבר תשובתך.

ב. האם הגוף חוזר לנקודת המוצא במהירות גדולה ממהירותו ההתחלתית, קטנה ממנה או שווה לה? הסבר את תשובתך.

30.

מניחים גוף על מישור משופע לא חלק שזווית שיפועו 50° ומקנים לו בזמן $t=0$ מהירות התחלתית שגודלה 12m/s בכיוון מעלה המישור המשופע.

נתון שמקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף למשטח הם 0.9 ו-0.3, בהתאמה. בחר את הכיוון החיובי של ציר התנועה (ציר x) בכיוון מעלה המישור המשופע ואת $x=0$ להיות מיקום הגוף ב- $t=0$.

א. חשב את תאוצת הגוף במהלך עלייתו. ב. חשב את הזמן שבו הגוף נעצר, ואת מיקומו בזמן זה.

ג. הראה שלאחר עצירתו הגוף חוזר בחזרה.

ד. חשב את תאוצת הגוף במהלך חזרתו.

ה. חשב את הזמן בו חוזר הגוף לנקודה $x=0$.

ו. חשב את מהירות הגוף בזמן שבו הוא חוזר ל- $x=0$.

5. החוק השני של ניוטון בבעיות הדנות בשני גופים הנעים בתאוצה זהה

31.

קושרים שני גופים זה לזה באמצעות חוט שמסתו זניחה. מסת הגוף הראשון m ומסת השני $2m$. מחזיקים את הגוף הראשון כך ששני הגופים נמצאים באוויר כפי שמתואר בתרשים שלפניך, ולאחר מכן משחררים את

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

חלק וקשורים זה לזה באמצעות חוט שמסתו זניחה.

מסת הגוף 1 היא $m_1 = 1\text{kg}$ ומסת הגוף 2 היא $m_2 = 2\text{kg}$. מפעילים על הגוף 1 כוח אופקי F כפי שמתואר בתרשים הבא.



נתון שמקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגופים והמשטח הם 0.6 ו-0.2, בהתאמה.

- חשב את גודלו של הכוח F על מנת שהמערכת תהיה על סף תנועה.
- נתון כי הכוח F גדול פי 2 מהכוח שחיבת בסעיף הקודם. חשב את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט.

35.

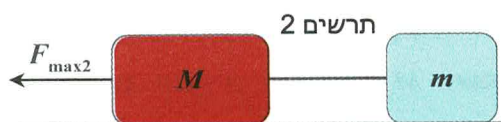
שני גופים מונחים על משטח אופקי וחלק ומחברים זה לזה באמצעות חוט שמסתו זניחה.

נתון שמסת אחד הגופים היא $m = 0.5\text{kg}$ ושמסת הגוף האחר היא $M = 1.5\text{kg}$, ונתון שהחוט המחובר בין שני הגופים יכול לשאת מתיחות מקסימלית של 12N .

- חשב את גודלו המקסימלי של הכוח האופקי F ($F_{\max 1}$) שאפשר להפעיל על הגוף שמסתו m על מנת שהחוט לא ייקרע (ראה תרשים 1).



- חשב את גודלו המקסימלי של הכוח האופקי F ($F_{\max 2}$) שאפשר להפעיל על הגוף שמסתו M על מנת שהחוט לא ייקרע (ראה תרשים 2).

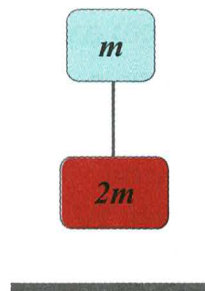


- קבע על מי משני הגופים המתוארים בכל אחד מהתרשימים 1 ו-2 הכוח השקול הוא גדול יותר. הסבר את תשובתך.

36.

שני גופים, הראשון מסתו 6kg והשני מסתו

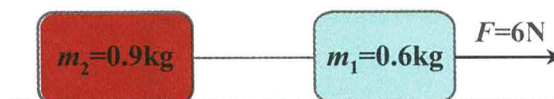
המערכת.



- חשב את תאוצת המערכת.
- חשב את המתיחות בחוט.

32.

מניחים שני גופים על משטח אופקי וחלק. מסת הגוף הראשון $m_1 = 0.6\text{kg}$ ומסת הגוף השני $m_2 = 0.9\text{kg}$. קושרים את שני הגופים זה לזה באמצעות חוט שמסתו זניחה, ומפעילים על הגוף הראשון כוח אופקי שגודלו $F = 6\text{N}$ כפי שמתואר בתרשים הבא.



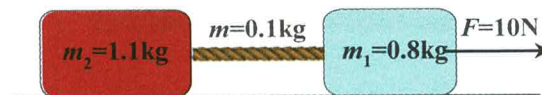
- חשב את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט.
- חשב את התאוצה המקסימלית האפשרית על מנת שהחוט לא ייקרע אם נתון שהוא יכול לשאת מתיחות מקסימלית של 18N .
- חשב את הכוח F המופעל על המערכת במקרה המתואר בסעיף ב'.

33.

שני גופים 1 ו-2 מונחים על משטח אופקי וחלק וקשורים זה לזה באמצעות חבל שמסתו לא זניחה.

מסת הגוף 1 היא $m_1 = 0.8\text{kg}$, מסת הגוף 2 היא $m_2 = 1.1\text{kg}$ ומסת החבל היא 0.1kg .

מפעילים על הגוף 1 כוח אופקי שגודלו 10N כפי שמתואר בתרשים שלפניך.



- חשב את תאוצת המערכת.
- חשב את המתיחות בקצוות החבל.

34.

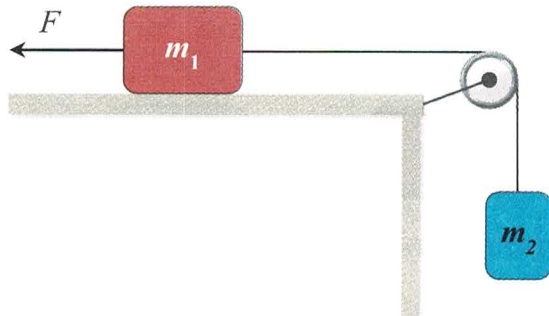
שני גופים 1 ו-2 מונחים על משטח אופקי לא

לא חלק ומקדם החיכוך הקינטי בין כל אחד משני הגופים והמשטח הוא μ_k . נתון שהמערכת נמצאת בתנועה על המשטח.

38.

בתרשים שלפניך מתואר גוף שמסתו $m_1 = 2\text{ kg}$ המונח על משטח אופקי וחלק. הגוף קשור לקצה חוט אידיאלי הכרוך סביב גלגלת אידיאלית הקבועה בקצה המשטח, ובקצה השני של החוט קשור גוף אחר שמסתו $m_2 = 0.5\text{ kg}$. גוף זה נמצא באוויר.

מפעילים על הגוף הראשון כוח אופקי F בכיוון שמאל, כך שהמערכת נמצאת במנוחה, ולאחר מכן מפסיקים את הפעלת הכוח F והמערכת מתחילה לנוע בתאוצה.



- חשב את המתיחות בחוט כאשר המערכת הייתה במנוחה.
- חשב את גודלו של הכוח F .
- חשב את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט לאחר שהכוח F מפסיק לפעול.
- הסבר מדוע המתיחות בחוט קטנה כאשר המערכת נעה בתאוצה, לעומת המצב שבו הייתה במנוחה.

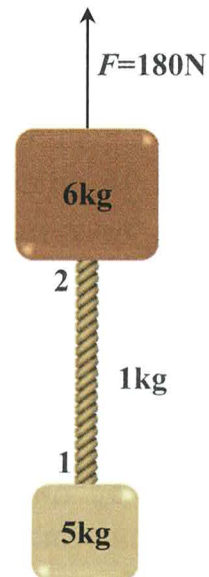
39.

מניחים גוף שמסתו M על משטח אופקי וחלק ומפעילים עליו כוח F המקביל למשטח (ראה תרשים 1).



- בטא באמצעות F ו- M את תאוצת המערכת.
- קושרים את המסה M לקצה חוט אידיאלי וכורכים את החוט סביב גלגלת אידיאלית הנמצאת בקצה המשטח עליו מונחת המסה.

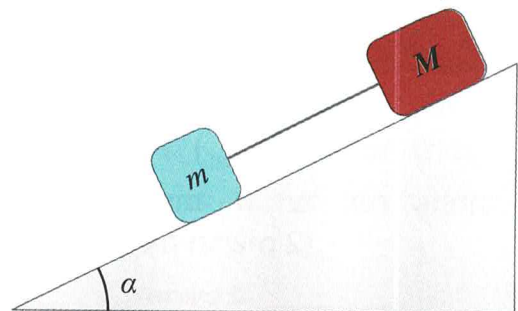
5 kg, קשורים זה לזה באמצעות חבל שמסתו 1 kg. מערכת זו נעה בתאוצה בכיוון אנכי כלפי מעלה כתוצאה מפעולת כוח F שגודלו 180 N על הגוף שמסתו 6 kg (ראה תרשים). כיוון הכוח F אנכי כלפי מעלה.



- שרטט את שלושת הגופים (שני הגופים והחבל) והוסף לכל אחד מהם תרשים של הכוחות הפועלים עליו.
- חשב את תאוצת המערכת.
- חשב את המתיחות בקצוות החבל (בקצוות 1 ו-2 בתרשים).

37.

שני גופים, הקשורים זה לזה באמצעות חוט, נעים על מישור משופע וחלק שזווית השיפוע שלו α (ראה תרשים).



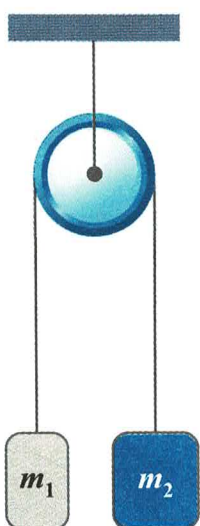
נתון שמסות הגופים הן m ו- M ושמסת החוט זניחה.

- מצא את תאוצת המערכת. בטא את תשובתך באמצעות נתוני הבעיה, כולם או חלקם.
- חשב את המתיחות בחוט.
- ענה על הסעיפים א ו-ב במקרה והמשטח

שחישבת בסעיף א'.
ג. חשב את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט אם m_2 גדולה פי 2 מהמסה שחישבת בסעיף א'.

41.

קושרים גלגלת אידיאלית לתקרה באמצעות חוט וכורים סביבה חוט אידיאלי. קושרים קצה אחד של החוט לגוף שמסתו m_1 ולקצה האחר קושרים גוף שמסתו m_2 . משחררים את שני הגופים באוויר כפי שמתואר בתרשים הבא. נתון $m_1 = 0.4 \text{ kg}$ ו- $m_2 = 0.6 \text{ kg}$.



א. חשב את גודלו של הכוח F שיש להפעיל על m_1 בכיוון אנכי כלפי מטה על מנת להחזיק את המערכת במנוחה.
ב. משחררים את המערכת. חשב את תאוצת הגופים ואת המתיחות בחוט.

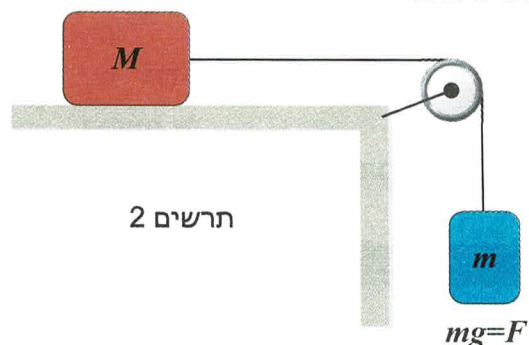
42.

בתרשים שלפניך נתון שהחוטים אידיאליים, $M_1 = M_2 = 2 \text{ kg}$ ו- $m = 1 \text{ kg}$. משחררים את המערכת ממנוחה בזמן $t = 0$.

א. קבע מי משתי המתיחות T_2 או T_3 גדולה יותר. הסבר.
ב. חשב את תאוצת המערכת ואת המתיחות T_1 , T_2 ו- T_3 .

ג. ב- $t = 3 \text{ s}$ נקרע החוט הקשור למסה m .
(1) חשב את מהירות המערכות ברגע בו החוט נקרע.
(2) חשב את תאוצת המערכת לאחר שהחוט נקרע.

לקצה האחר של החוט קושרים מסה m ומשחררים אותה באוויר, כפי שמתואר בתרשים 2.



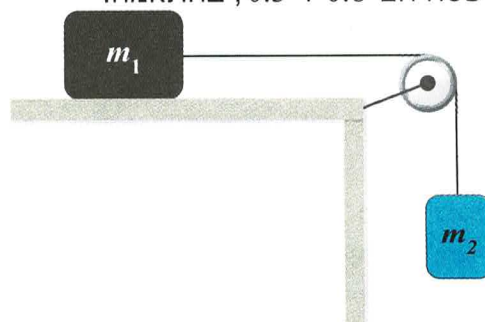
נתון שכוח הכובד שפועל על המסה m שווה לכוח F שבתרשים 1, כלומר מתקיים $mg = F$.

ב. האם תאוצת המערכת המתוארת בתרשים 2 שווה לתאוצה שחישבת בסעיף א', גדולה ממנה או קטנה ממנה? השב בהסתמך על שיקולים פיזיקליים ולא על שיקולים מתמטיים בלבד.

ג. מצא את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט במצב המתואר בתרשים 2. בטא את תשובתך באמצעות נתוני הבעיה.
ד. מחליפים בין שתי המסות m ו- M במערכת המתוארת בתרשים 2. מצא את תאוצת המערכת ואת המתיחות בחוט במקרה זה. בטא את תשובתך באמצעות נתוני הבעיה.

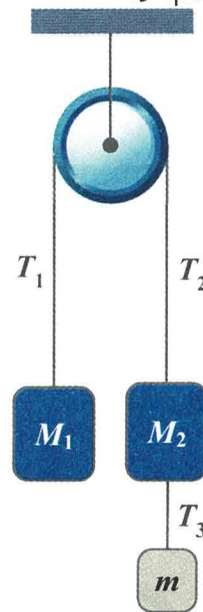
40.

במערכת המתוארת בתרשים נתון $m_1 = 2 \text{ kg}$ ושמקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין m_1 והמשטח הם 0.3 ו- 0.8, בהתאמה.



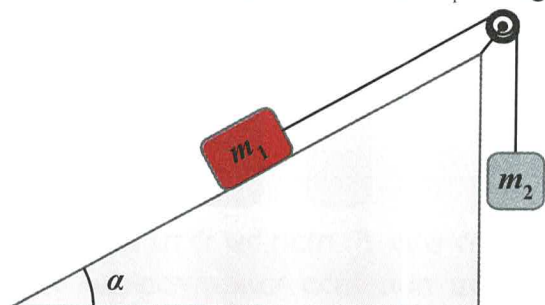
א. חשב את גודל המסה m_2 על מנת שהמערכת תהיה על סף תנועה.
ב. חשב את כוח החיכוך הסטטי הפועל על m_1 אם m_2 שווה למחצית המסה

3) תאר את תנועת המערכת לאחר שהחוט נקרע.



43.

במערכת המתוארת בתרשים שלפניך נתון שהמישור המשופע חלק, $\alpha = 60^\circ$ ו- $m_1 = 4 \text{ kg}$. מסת החוט זניחה.



א. חשב מה צריך להיות גודל המסה m_2 על מנת שהמערכת תהיה במצב שווי משקל.
 ב. חשב את תאוצת המערכת כאשר:
 1) m_2 גדול פי 2 מהמסה שחישבת בסעיף א.
 2) m_2 שווה למחצית המסה שחישבת בסעיף א.

44.

נתונה המערכת מהבעיה הקודמת, רק שהפעם המישור המשופע אינו חלק. מקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין m_1 והמשטח הם 0.5 ו-0.2, בהתאמה.
 א. חשב את גודל m_2 על מנת שהמערכת תהיה על סף תנועה בכיוון מחוגי השעון.
 ב. חשב את גודל m_2 על מנת שהמערכת

תהיה על סף תנועה נגד כיוון מחוגי השעון.
 ג. חשב את תאוצת המערכת במקרים הבאים:
 1) m_2 גדולה פי 2 מהמסה שחישבת בסעיף א'.
 2) m_2 קטנה פי 2 מהמסה שחישבת בסעיף ב'.

6. כוח הכובד, המשקל והקשר ביניהם

45.

א. הגדר את כוח הכובד וציין את מאפייניו.
 ב. הגדר את המשקל וציין את מאפייניו.
 ג. מהם התנאים שצריכים להתקיים על מנת שמשקלו של גוף יהיה זהה לכוח הכובד הפועל עליו. הסבר.
 ד. תן דוגמאות למקרים שבהם משקלו של גוף שונה מכוח הכובד שפועל עליו.

46.

אדם עומד על מאזני כוח הנמצאים על רצפת מעלית.

א. קבע באלו מקרים קריאת המאזניים שווה לכוח הנורמלי N המופעל על האדם העומד על המאזניים.
 ב. קבע באלו מקרים קריאת המאזניים שווה לכוח הכובד F_G הפועל על האדם העומד על המאזניים.

47.

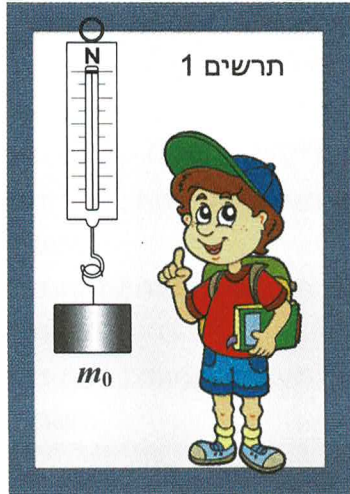
גוף שמסתו 5 kg מונח על מאזני כוח הנמצאים על רצפת מעלית. חשב את קריאת המאזניים במקרים הבאים:
 א. כאשר המעלית נמצאת במנוחה.
 ב. כאשר המעלית נעה כלפי מעלה במהירות קבועה.
 ג. כאשר המעלית נעה כלפי מעלה בתאוצה של 6 m/s^2 .
 ד. כאשר המעלית נעה כלפי מטה ומקטינה את מהירותה בקצב קבוע של 6 m/s^2 .
 ה. כאשר המעלית נעה כלפי מטה בתאוצה של 5 m/s^2 .
 ו. כאשר המעלית נעה כלפי מעלה ומקטינה את מהירותה בקצב קבוע של 5 m/s^2 .
 ז. כאשר המעלית נופלת נפילה חופשית.

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 7: החוק השני של ניוטון

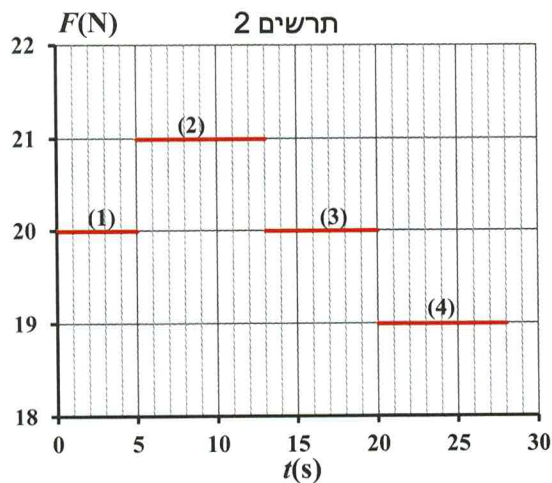
48.

תנועתה.

בזמן $t=0$, כאשר המעלית הייתה במנוחה, התלמיד מתחיל למדוד את קריאת הדינמומטר (ביחידות ניוטון) כפונקציה של הזמן.



הגרף בתרשים 2 מתאר את תוצאות המדידות. הכיוון החיובי נבחר כלפי מעלה.



א. חשב את גודל המסה m_0 .

ב. חשב את תאוצת המעלית בשלבים השונים של התנועה.

ג. תאר את תנועת המעלית וכיוונה בשלבים שונים (מנוחה, תנועה במהירות קבועה, תאוצה קבועה וכיוונה).

ד. שרטט גרף המתאר את מהירות המעלית

החל מ- $t=0$ ועד $t=28s$.

ה. התייחס לפרק הזמן מ- $t=0$ ועד $t=28s$ וחשב את:

(1) העתק המעלית.

(2) המהירות הממוצעת של המעלית.

ו. אם המעלית הייתה בתנועה במהירות

אדם שמסתו 65 kg עומד על מאזני כוח הנמצאים על רצפת מעלית. הוריית המאזנים היא 620 N .

א. מהו משקלו של האדם בתוך המעלית.

ב. חשב את הכוח הנורמלי שהמאזניים מפעילים על האדם.

ג. מהי הסיבה לכך שמשקלו של האדם בתוך המעלית קטן מכוח הכובד הפועל עליו.

ד. חשב את תאוצת המעלית (גודל וכיוון).

ה. האם ניתן לקבוע על פי נתוני השאלה את כיוון תנועת המעלית? הסבר.

49.

על מנת למדוד את תאוצתה של מעלית, תלמיד קושר גוף שמסתו 1.6 kg לתקרת המעלית באמצעות קפיץ. התלמיד מצא כי כאשר המעלית הייתה במנוחה הקפיץ התארך ב- 8 cm .

א. חשב את קבוע הקפיץ.

ב. חשב את התארכות הקפיץ כאשר המעלית עולה כלפי מעלה במהירות קבועה.

ג. בשלב מסוים במהלך תנועת המעלית, התלמיד מצא שהתארכות הקפיץ 12 cm .
(1) מצא את משקלו של הגוף במקרה זה.
(2) חשב את תאוצת המעלית (גודל וכיוון).

(3) האם ניתן לקבוע את כיוון תנועת המעלית במקרה זה? הסבר.

ד. חשב את התארכות הקפיץ כאשר המעלית נעה כלפי מטה בתאוצה של 2 m/s^2 .

ה. האם תשתנה התארכות הקפיץ שחישבת בסעיף הקודם אם נתון שהמעלית נעה כלפי מעלה ומקטינה את מהירותה בקצב קבוע של 2 m/s^2 .

50.

תלמיד קושר קצה של דינמומטר לתקרת מעלית ולקצה האחר הוא מחבר מסה m_0 , כפי שמתואר בתרשים 1.

המעלית סגורה כך שהתלמיד אינו יכול לדעת אם המעלית נעה, ואם היא נעה את כיוון

קבועה כלפי מעלה ב- $t=0$, האם צורת הגרף המוצג בתרשים 2 הייתה משתנה? הסבר את תשובתך.

51.

גוף שמסתו 4 kg מונח על רצפת מעלית. נתון שמקדם החיכוך הסטטי בין הגוף לרצפת המעלית הוא 0.6 . חשב את גודלו של הכוח האופקי שיש להפעיל על הגוף על מנת שהגוף יהיה על סף תנועה במקרים הבאים:

א. המעלית נעה במהירות קבועה של 4 m/s בכיוון מעלה.

ב. המעלית נעה בתאוצה קבועה של 4 m/s^2 בכיוון מעלה.

ג. המעלית נעה בתאוצה קבועה של 4 m/s^2 בכיוון מטה.

7. תנועה על פני כדור הארץ

52.

גוף נמצא במנוחה על פני כדור הארץ. האם הגוף יכול לנוע ללא אינטראקציה בינו לבין גופים אחרים בסביבתו? הסבר או תן דוגמה.

53.

לגבי כל אחד מהמשפטים הבאים, קבע אם הוא נכון או שגוי. הסבר.

א. גוף שעבורו שקול הכוחות הפועלים עליו מתאפס הוא נמצא במנוחה.

ב. על מנת לשנות מצב התמדה של גוף (מנוחה או מהירות קבועה) יש להפעיל עליו כוח.

ג. על פני כדור הארץ, על מנת לשמור על מצב התמדה של גוף יש להפעיל עליו כוח.

ד. שינוי מצב התמדה של גוף מחייב אינטראקציה בינו לבין גוף אחר.

54.

אדם נמצא בתוך תיבה גדולה המונחת על משטח אופקי וחלק. האם האדם יכול לדחוף את התיבה כשהוא בתוכה, כך שהתיבה תנוע על פני המשטח.

55.

א. תאר את האינטראקציה המתרחשת בעת הליכת אדם על הקרקע, אינטראקציה המאפשרת לאדם ללכת.

ב. קבע את סוגו של החיכוך הפועל בין רגלי

האדם והקרקע בעת הליכה.

56.

מכונית מתחילה לנוע ממנוחה.

א. תאר את תפקיד מנוע המכונית בתהליך תנועתה.

ג. תאר את האינטראקציה המתרחשת בעת תנועת מכונית על הכביש, אינטראקציה המאפשרת למכונית לנוע.

ב. קבע את סוג החיכוך הפועל בין צמיגי המכונית והכביש במהלך תנועת המכונית.

57.

אדם שמסתו 50 kg מתחיל בריצה איטית (ממנוחה) בתאוצה של 0.6 m/s^2 . קבע את גודלו וכיוונו של החיכוך הסטטי שפועל על נעלי האדם.

58.

רכב שמסתו $2,000\text{ kg}$ נע במהירות קבועה על כביש אופקי וישר. הנהג רואה חפץ במרחק מסוים, בולם והרכב מתחיל להאט את מהירותו בקצב קבוע של 4 m/s^2 .

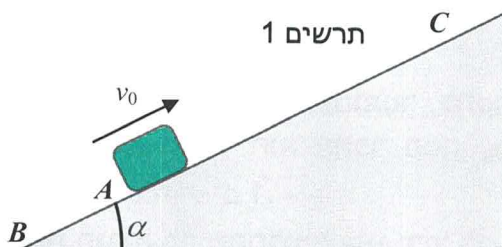
א. מצא את גודלו ואת כיוונו של החיכוך הסטטי המופעל על צמיגי הרכב במהלך תהליך העצירה.

ב. חשב את גודלה של התאוצה המקסימלית האפשרית עבור הרכב על מנת שלא יחליק, אם נתון שמקדם החיכוך הסטטי בין צמיגי הרכב והכביש הוא 0.8 .

בעיות כלליות

59.

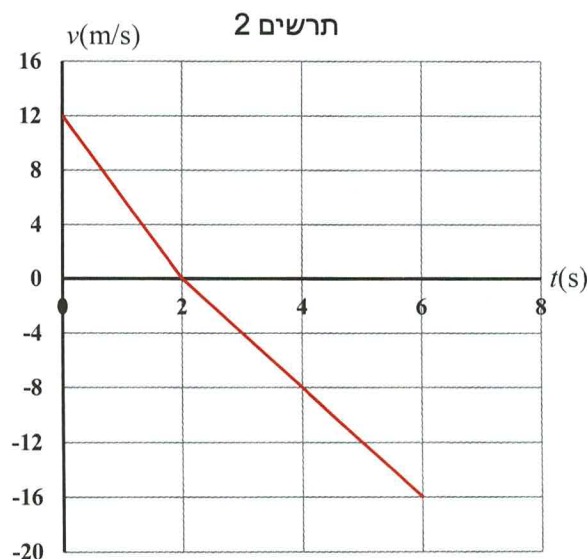
על מישור משופע לא חלק מניחים גוף בנקודה המסומנת ב- A ומקנים לו (ברגע $t=0$) מהירות התחלתית בכיוון מעלה המישור המשופע. הנקודה A נמצאת במרחק מסוים מהקצה התחתון של המישור המשופע, שמסומן באות B (ראה תרשים 1).



הגוף עולה, מגיע לנקודה C וחוזר בחזרה עד

לנקודה B.

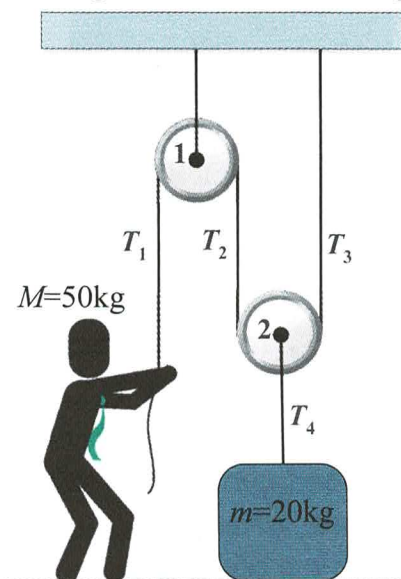
הגרף המתואר בתרשים 2 מתאר את מהירות הגוף החל מ- $t=0$ ועד הזמן שבו הוא מגיע לנקודה B. (שים לב שעל פי הגרף, הכיוון החיובי שנבחר הוא בכיוון מעלה המישור המשופע).



- תאר במילים את תנועת הגוף וזאת על סמך הגרף שבתרשים 2.
- העזר בגרף וחשב את:
 - המהירות ההתחלתית של הגוף.
 - תאוצתו במהלך תנועתו על המישור המשופע (בעלייה וגם בירידה).
- שרטט תרשים של הכוחות הפועלים על הגוף במהלך תנועתו על המישור המשופע (הן בעלייה והן בירידה).
- בעזרת תרשימי הכוחות ששרטטת בסעיף הקודם ועל סמך החוק השני של ניוטון בטא את תאוצת הגוף במהלך עלייתו ובמהלך ירידתו. הבע את תשובתך באמצעות זווית השיפוע של המישור המשופע α , ומקדם החיכוך הקינטי בין הגוף והמשטח, μ_k .
- בהסתמך על הביטויים שקיבלת בסעיף הקודם ועל הגרף המתואר בתרשים 2 חשב את α ואת μ_k .
- חשב את מרחק הנקודה B מהנקודה A.
- חשב את הדרך שעבר הגוף מהנקודה בה היה ברגע $t=0$ ועד לנקודה B.

60.

בתרשים שלפניך, נתון שהגלגלות והחוטים אידיאליים, הגלגלת 1 קבועה במקומה והגלגלת 2 יכולה לשנות את מקומה. מסת הגוף $m=20\text{kg}$ ומסת האדם $M=50\text{kg}$.



- חשב את גודלו של הכוח שעל האדם להפעיל כלפי מטה על קצה החבל על מנת שהכוח הנורמלי הפועל על הגוף יתאפס.
- חשב את תאוצת הגוף אם האדם מפעיל על קצה החבל בו הוא מחזיק כוח כלפי מטה הגדול פי 2 מהכוח שחישובת בסעיף הקודם.
- חשב את הכוח שהאדם מפעיל על הרצפה במצב המתואר בסעיף ב.

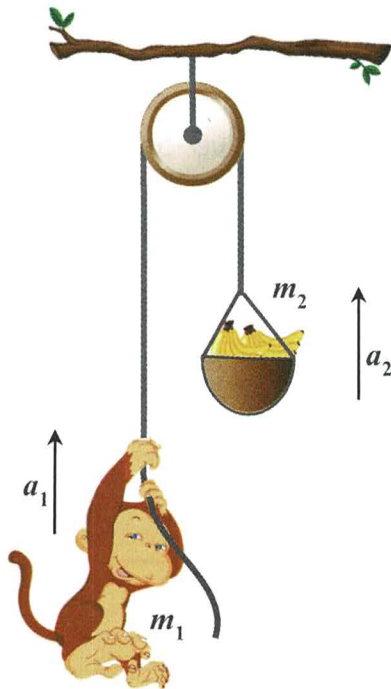
61.

ענה על השאלה הקודמת אם נתון שמסת הגלגלת 2 אינה זניחה והיא שווה ל- 10kg .

62.

עגלה נעה על משטח אופקי בתאוצה קבועה שגודלה a . על הדופן הקדמית של העגלה נמצא גוף המוחזק במקומו על ידי כוח החיכוך בלבד (ראה תרשים).

נתון שמישור הדופן הקדמית של העגלה ניצב לפני המשטח וגם לכיוון תאוצת העגלה. מסת העגלה M , מסת הגוף m ומקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף והדופן הקדמית של העגלה הם μ_s ו- μ_k , בהתאמה.



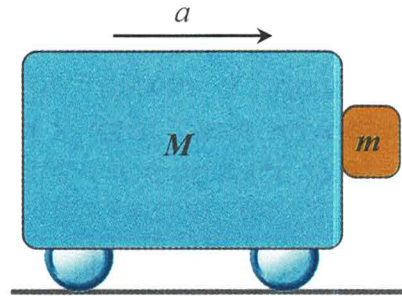
64.

בתרשים שלפניך מתואר אדם שיושב על כיסא הקשור לקצה חבל הכרוך סביב גלגלת הקשורה לתקרה, ואוחז בקצה השני של החבל.



האדם מפעיל על החבל כוח כלפי מטה שכתוצאה ממנו הכיסא וביחד אתו האדם עולים בתאוצה קבועה a כלפי מעלה. נתון שמסת האדם היא M , שמסת הכיסא m ושמסת החבל זניחה.

א. שרטט תרשים ובו האדם, הכיסא ומערכת האדם והכיסא - כל אחד בנפרד. הוסף לתרשים חיצים המייצגים את הכוחות הפועלים על גופים אלה.



א. שרטט תרשים של הכוחות הפועלים על הגוף במצב המתואר באיור.
ב. בטא את הכוחות ששרטטת בסעיף הקודם באמצעות הגדלים m , g ו- a (כולם או חלקם).

ג. מצא את התאוצה שעבורה הגוף נמצא על סף תנועה כלפי מטה. בטא את תשובתך באמצעות הגדלים μ_s ו- g .

ד. מצא את גודלו של החיכוך הסטטי שפועל על הגוף כאשר העגלה נעה בתאוצה הגדולה פי 2 מהתאוצה שחישבת בסעיף הקודם. בטא את תשובתך באמצעות m ו- g .

ה. נתון שהעגלה נעה בתאוצה השווה למחצית התאוצה שמצאת בסעיף ג'. חשב את התאוצה שבה הגוף מחליק על הדופן הקדמית של העגלה. בטא את תשובתך באמצעות μ_s , μ_k ו- g .

63.

בתרשים שלפניך מתואר קוף שאוחז בקצה חבל שמסתו זניחה הכרוך סביב גלגלת הקשורה לתקרה. לקצה האחר של החבל קשור סל ובתוכו בננות.

הקוף מטפס על החבל בתאוצה של 0.5 m/s^2 כלפי מעלה במטרה להגיע אל הסל. כתוצאה מהכוח שהקוף מפעיל על החבל, הסל עולה גם כן בתאוצה כלפי מעלה. נסמן תאוצה זו ב- a_2 .

נתון: מסת הקוף $m_1 = 2.4 \text{ kg}$ ומסת הסל כולל הבננות שבתוכו היא $m_2 = 2 \text{ kg}$.

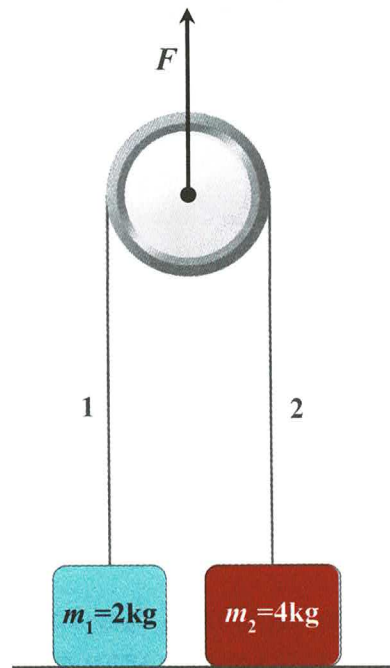
א. ציין מהם הכוחות הפועלים על הקוף ועל הסל.

ב. חשב את הכוח שהקוף מפעיל על החבל.
ג. חשב את תאוצת הסל בתנועתו כלפי מעלה, a_2 .

ב. רשום את החוק השני של ניוטון עבור כל אחד משלושת הגופים בסעיף הקודם.
ג. בחר שתי משוואות מתוך שלוש המשוואות שרשמת בסעיף הקודם ומצא בעזרתן את המתיחות בחבל ואת הכוח שהאדם מפעיל על הכיסא. בטא את תשובתך באמצעות הגדלים: M , m ו- a .

65.

במערכת המתוארת בתרשים הבא נתון $m_1 = 2\text{ kg}$ ו- $m_2 = 4\text{ kg}$. על מרכז הגלגלת פועל כוח קבוע F בכיוון מעלה. שתי המסות מונחות בהתחלה על הרצפה. נתון שהגלגלת אידיאלית (מסתה זניחה) ומסת החוט זניחה.



- מהו גודל הכוח F שעבורו המסה m_1 נמצאת על סף התנתקות מהרצפה.
- חשב את הכוח שהמסה m_2 מפעילה על הרצפה במצב המתואר בסעיף הקודם.
- מהו גודל הכוח F שעבורו המסה m_2 נמצאת על סף התנתקות מהרצפה.
- חשב את תאוצת המסה m_1 במקרה המתואר בסעיף הקודם.
- נתון ש- $F = 100\text{ N}$. חשב את המתיחות בחוט ואת תאוצת כל אחת משתי המסות.